



RÉGIS MARCIANO DE SOUZA

**SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DE
DIFERENTES DOSAGENS DE CONCRETO EM
AMBIENTES EDIFICADOS**

**LAVRAS - MG
2023**

RÉGIS MARCIANO DE SOUZA

**SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DE DIFERENTES DOSAGENS DE
CONCRETO EM AMBIENTES EDIFICADOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, linha de pesquisa em Construções, Ambiente e Tratamento de Resíduos, para a obtenção do título de Doutor.

Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

Prof. Dr. Alessandro Torres Campos
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Souza, Régis Marciano de
Sustentabilidade ambiental de diferentes dosagens de concreto em
ambientes edificados
/ Régis Marciano de Souza. – Lavras : UFLA, 2023.
108 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães.
Corientador: Prof. Dr. Alessandro Torres Campos.

Tese (Doutorado Acadêmico)–Universidade Federal de Lavras,
2023.

Bibliografia.

1. Material de construção. 2. Sistema ANFIS. 3. Avaliação do ciclo
de vida. 4. Energia incorporada. 5. Emissões de carbono incorporadas.
I. Magalhães, Ricardo Rodrigues. II. Campos, Alessandro Torres. III.
Título.

RÉGIS MARCIANO DE SOUZA

**SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL DE DIFERENTES DOSAGENS DE
CONCRETO EM AMBIENTES EDIFICADOS**

**ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY OF DIFFERENT CONCRETE MIXTURES
IN BUILT ENVIRONMENTS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia Agrícola, linha de pesquisa em Construções, Ambiência e Tratamento de Resíduos, para a obtenção do título de Doutor.

APROVADA em 29 de agosto de 2023.

Dr. Alessandro Vieira Veloso UFLA
Dr. Matheus Campos Mattioli SENAI
Dr. Carlos Cezar da Silva IFSULDEMINAS
Dra. Geslaine Frimaio da Silva IFSULDEMINAS



Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães
Orientador

Prof. Dr. Alessandro Torres Campos
Coorientador

**LAVRAS - MG
2023**

Dedico este trabalho aos professores que fizeram parte da minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo fôlego de vida, pelas oportunidades, pela força em todos os momentos e por esta conquista.

A toda minha família, por ter acreditado em mim. Em especial, à minha esposa Siliane de Souza Aquino pelo carinho, compreensão e incentivo.

Ao Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães, orientador neste doutoramento em Engenharia Agrícola, pela confiança, amizade, orientações, correções e incentivo.

Ao Prof. Dr. Alessandro Torres Campos, coorientador neste doutoramento, pela confiança, amizade, incentivo, orientações e revisões.

Ao Prof. Dr. Alessandro Vieira Veloso, da Universidade Federal de Lavras - UFLA, pelas contribuições na escrita do artigo sobre sustentabilidade ambiental de concretos para biodigestores na suinocultura.

Ao Prof. Dr. Marcio Montagnana Vicente Leme, da Universidade Federal de Lavras - UFLA, pelas contribuições na escrita do artigo sobre avaliação do impacto ambiental de concretos para uma habitação rural.

Ao Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior e ao Prof. Dr. Leonardo Schiassi, da Universidade Federal de Lavras - UFLA, pela apresentação ao universo da modelagem de sistemas fuzzy.

Ao doutorando Yuri Vilas Boas Ortigara e equipe (Prof. Dr. Carlos Eduardo Marmorato Gomes e Prof.^a Dra. Patricia Stella Pucharelli Fontanini), da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, pela parceria na escrita de um artigo sobre sustentabilidade ambiental na reutilização de RLS.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Ricardo Rodrigues Magalhães (Presidente), Prof. Dr. Alessandro Torres Campos (Interno), Dr. Alessandro Vieira Veloso (Externo ao Programa), Dr. Matheus Campos Mattioli (Externo à instituição), Dr. Carlos Cezar da Silva (Externo à instituição) e Dra. Geslaine Frimaio da Silva (Externo à instituição), pela atenção e disponibilidade.

À Universidade Federal de Lavras - UFLA pela oportunidade concedida para a realização do doutorado. Particularmente aos docentes e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pelo apoio, atenção e colaboração.

Ao Me. David da Silva Fonseca e ao Me. Lucas Rodrigues Fagundes, pela amizade e apoio com os ensaios de laboratório.

Ao Prof. Ernani Augusto de Souza Junior pelo apoio com as revisões de português e inglês na primeira parte desta tese.

Aos meus queridos alunos e colegas de trabalho, pelos momentos vivenciados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas - IFSULDEMINAS.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas - IFSULDEMINAS, pelo apoio na realização desta qualificação profissional.

Aos profissionais da área de saúde que direta ou indireta colaboraram para essa realização profissional.

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para realização deste doutoramento em Engenharia Agrícola.

Obrigado!

"A compreensão é como a luz que dissipa a escuridão."
Jiddu Krishnamurti

"Para resolver os problemas ambientais é preciso compreender profundamente suas consequências, impactos e implicações. Destarte, instituirá uma viragem consciente para tomada de decisão em busca de um desenvolvimento ecologicamente sustentável."
Régis Marciano de Souza

"Nossos recursos naturais podem não estar se acabando; o que está se acabando é o meio ambiente que dá sustentabilidade à vida (não apenas à economia)."
P. Kumar Mehta e Paulo J. M. Monteiro

RESUMO

A escolha adequada do quantitativo dos materiais incorporados nas misturas de concreto ainda se revela como grande desafio para o projeto da sustentabilidade ambiental de dosagens. Assim, nesta extensa pesquisa, quatro distintas perspectivas foram desenvolvidas para explorar cientificamente a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de diferentes misturas de concreto. De forma geral, investigou-se o uso de modelagem híbrida ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) como ferramenta para predição do consumo energético incorporado de cada um dos componentes da produção de concretos convencionais (cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo) de uma edificação e para predição das emissões de dióxido de carbono (CO₂) de concretos convencionais para construção de biodigestores na suinocultura. De outro modo, buscou-se avaliar a sustentabilidade ambiental de concretos autoadensáveis com incorporação de resíduo de louça sanitária (RLS). Ainda, procurou-se a avaliação das emissões de carbono e energia incorporada no delineamento de dosagens convencionais de concretos para uma habitação rural. Dessa forma, evidenciou-se bons resultados nas predições computacionais ANFIS, na Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e das Emissões de CO₂ (ACVCO₂), de concretos em ambientes edificados. Do ponto de vista da sustentabilidade, constatou-se a importância da mensuração assertiva dos montantes dos materiais necessários para produção de concretos ambientalmente mais sustentáveis. Averiguou-se que racionalizar as dosagens pode gerar uma redução da ordem de 24,77% na demanda energética e 31,41% nas emissões de CO₂. Sobre o uso de RLS, identificou-se uma notável colaboração para o crescimento sustentável, gerada pela redução da disposição inadequada do RLS no meio ambiente e pelo incremento de vida útil para os resíduos, garantindo assim estratégias significativas para o projeto de dosagens de concretos. Apesar de possíveis implicações em larga escala, as propostas desta tese se mostram promissoras para o combate do impacto ambiental gerado pela indústria do concreto.

Palavras-chave: Material de construção. Sistema ANFIS. Avaliação do ciclo de vida. Energia incorporada. Emissões de carbono incorporado.

ABSTRACT

The appropriate selection of material quantities integrated into concrete mixes remains a challenge in designing environmentally sustainable mix proportions. Consequently, this extensive study adopts four distinct perspectives to systematically explore the Life Cycle Assessment (LCA) of diverse concrete compositions. Specifically, the research delves into the application of hybrid ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) modeling as a predictive tool for quantifying the embodied energy consumption associated with each constituent in the production of conventional concretes (namely cement, water, fine aggregate, and coarse aggregate) utilized in a construction project. Additionally, the ANFIS model aids in forecasting carbon dioxide (CO₂) emissions linked to conventional concrete employed in constructing biodigesters within pig farming facilities. Parallely, an assessment is conducted on the environmental sustainability of self-compacting concretes featuring the integration of sanitary ware waste (SWW). Furthermore, the study examines carbon emissions and the embodied energy within the context of designing conventional concrete mixtures for rural residential structures. As a result of this investigation, the computational predictions generated by the ANFIS model exhibit commendable accuracy in relation to the Life Cycle Energy Assessment (LCEA) and the Life Cycle Carbon Emissions Assessment (LCCO₂A) for concrete applications within built environments. From a sustainability standpoint, the study underscores the significance of precision in gauging the requisite material quantities for manufacturing environmentally more responsible concrete formulations. This meticulous approach to mix design has the potential to yield a substantial reduction of approximately 24.77% in energy demand, coupled with a noteworthy decline of 31.41% in CO₂ emissions. Pertaining to the incorporation of SWW, the study illuminates its profound contribution to sustainable development, manifesting through the curtailment of improper waste disposal in the environment and the extension of the useful life of such waste. This, in turn, fosters strategic pathways for optimizing concrete mix designs. Despite the potential ramifications when applied on a broader scale, the propositions advanced in this thesis exhibit promising prospects in addressing the environmental impact wrought by the concrete industry.

Keywords: Building material. ANFIS framework. Life cycle assessment. Energy consumption. Embodied carbon emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Sustentabilidade ambiental de diferentes dosagens de concreto (Estrutura de trabalho).	15
Figura 1.2 – Avaliação do ciclo de vida - Aplicações.	16
Figura 2.1 – Fluxo de vida dos concretos - Sistema de produção aberto.	22
Figura 2.2 – Fluxo de vida dos concretos - Sistema de produção fechado.	23
Figura 2.3 – Dinâmica entre as fases de uma ACV.	24
Figura 2.4 – Emissões de dióxido de carbono na produção de concreto dosado em central.	27
Figura 2.5 – Demanda de energia do concreto dosado em central.	27
Figura 2.6 – Arquitetura do sistema ANFIS.	29

SUMÁRIO

	PRIMEIRA PARTE	12
1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivo geral	16
1.1.2	Objetivos específicos	17
1.2	Publicações	17
1.3	Estrutura da tese	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Emprego de concreto em ambientes	20
2.2	Indicadores de impactos ambientais em concretos	22
2.3	Sistema adaptativo neuro-fuzzy	28
3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	32
	REFERÊNCIAS	33
	SEGUNDA PARTE - ARTIGOS	40
	ARTIGO I - MODELO NEURO-FUZZY PARA PREDIÇÃO DO APORTE DE ENERGIA DE DIFERENTES DOSAGENS DE CONCRETO EM EDIFICAÇÕES	41
	ARTIGO II - MODELO NEURO-FUZZY PARA PREDIÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DE DOSAGENS DE CONCRETO PARA BIODIGESTORES NA SUINOCULTURA	57
	ARTIGO III - ECOEFICIÊNCIA DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM RESÍDUO DE LOUÇA SANITÁRIA	72
	ARTIGO IV - AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE DIFERENTES DOSAGENS DE CONCRETOS PARA UMA HABITAÇÃO RURAL	88

PRIMEIRA PARTE

1 INTRODUÇÃO

O grande desafio enfrentado pela humanidade, com o crescimento demográfico, consiste em viabilizar um desenvolvimento ecologicamente sustentável de ambientes para abrigar atividades humanas, agrícolas, industriais, bem como a produção animal.

No projeto sustentável de ambientes os materiais empregados ocupam uma posição de destaque. Dissanayake, Jayasinghe e Jayasinghe (2017) reforçaram essa informação, afirmando que qualquer material de construção que minimize os impactos ambientais pode ter um futuro promissor. Para Mehta e Monteiro (2014), a escolha dos materiais de construção deve considerar o impacto ambiental das escolhas tecnológicas. Nesse ínterim, de acordo com Li et al. (2021), os materiais de construção são responsáveis por 97% do total das emissões de carbono em construções rurais.

O concreto é um dos materiais de construção mais difundidos no mundo, mas sua produção é responsável por quantidades significativas de consumo de energia e por emissões de gases do efeito estufa (WANG et al., 2017; NASERI et al., 2020). Segundo De Souza, Magalhães e De Andrade (2019), no Brasil, como em muitos outros países, o concreto desempenha um papel importante na construção, sendo o principal e mais consumido material de construção no mundo.

O cimento é o principal material da cadeia produtiva de concretos tradicionais. De acordo com o Sindicato Nacional da Indústria de Cimento (SNIC, 2020), o Brasil ocupa a sétima posição no *ranking* dos maiores consumidores de cimento no mundo. Ademais, o cenário brasileiro é responsável por um consumo aparente de 60,6 milhões de toneladas (SNIC, 2020) de cimento. Dos materiais incorporados na produção convencional de concretos, o cimento é o responsável por significativo impacto ambiental agregado (WANG et al., 2017; JOKAR; MOKHTAR, 2018; MINNU; BAHURUDEEN; ATHIRA, 2021).

Ainda que o cimento apresente valor significativo em relação à sustentabilidade, a escolha adequada do quantitativo dos materiais incorporados em misturas de concretos demonstra grande relevância para o desempenho físico, mecânico, químico e ambiental. Em relação ao avanço sustentável, o comportamento ambiental do quantitativo dos materiais incorporados em diferentes dosagens pode ser mensurado por meio da demanda energética e das emissões de dióxido de carbono (CO₂) na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Embora exista uma relação entre o consumo energético e as emissões de dióxido de carbono (CO₂), eles não são conside-

rados equivalentes (WOLF; POMPONI; MONCASTER, 2017), o que corrobora a necessidade de estudos combinados desses indicadores.

Pesquisas demonstraram as implicações promissoras da Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e da Avaliação do Ciclo de Vida das Emissões de CO₂ (ACVCO₂) na investigação da sustentabilidade ambiental de sistemas (XING et al., 2022; OZTURK et al., 2022; DELNAVAZ et al., 2022). Concomitante a essas aplicações de ACV, bons resultados têm sido obtidos com a substituição de matérias primas naturais por resíduos de outros setores produtivos (AKHTAR et al., 2022; MOHSENI pour asl et al., 2022; SARAVANAN; SRIDHAR, 2022; LU et al., 2022).

Com o intuito de aperfeiçoar o estudo da sustentabilidade ambiental de concretos, surge a tecnologia com diferentes práticas para solução de problemas ambientais. Dentre essas práticas, vale destacar o uso de ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*), que apresenta bons resultados em sistemas preditivos na avaliação ambiental de distintos cenários, conforme relatado por Barak e Sadegh (2016), Nilashi et al. (2018), Chen e Lee (2019), Nabavi-Pelesaraei et al. (2019), Prado, Minutolo e Kristjanpoller (2020) e Jallal et al. (2020).

Mousavi-Avval et al. (2017) afirmaram que ANFIS pode ser uma ferramenta útil para prever os índices energéticos, econômicos e ambientais dos sistemas de produção agrícola. Naji et al. (2016) utilizaram o ANFIS para estimar o consumo de energia de edificações, sendo os resultados obtidos mais confiáveis e precisos que aqueles obtidos por meio de ANN (*Artificial Neural Network*) e GP (*Genetic Programming*). Essa informação foi ratificada por Nabavi-Pelesaraei et al. (2018), que afirmaram que o modelo de predição por ANFIS é o mais indicado quando comparado com ANN, devido à maior velocidade computacional e sua alta precisão.

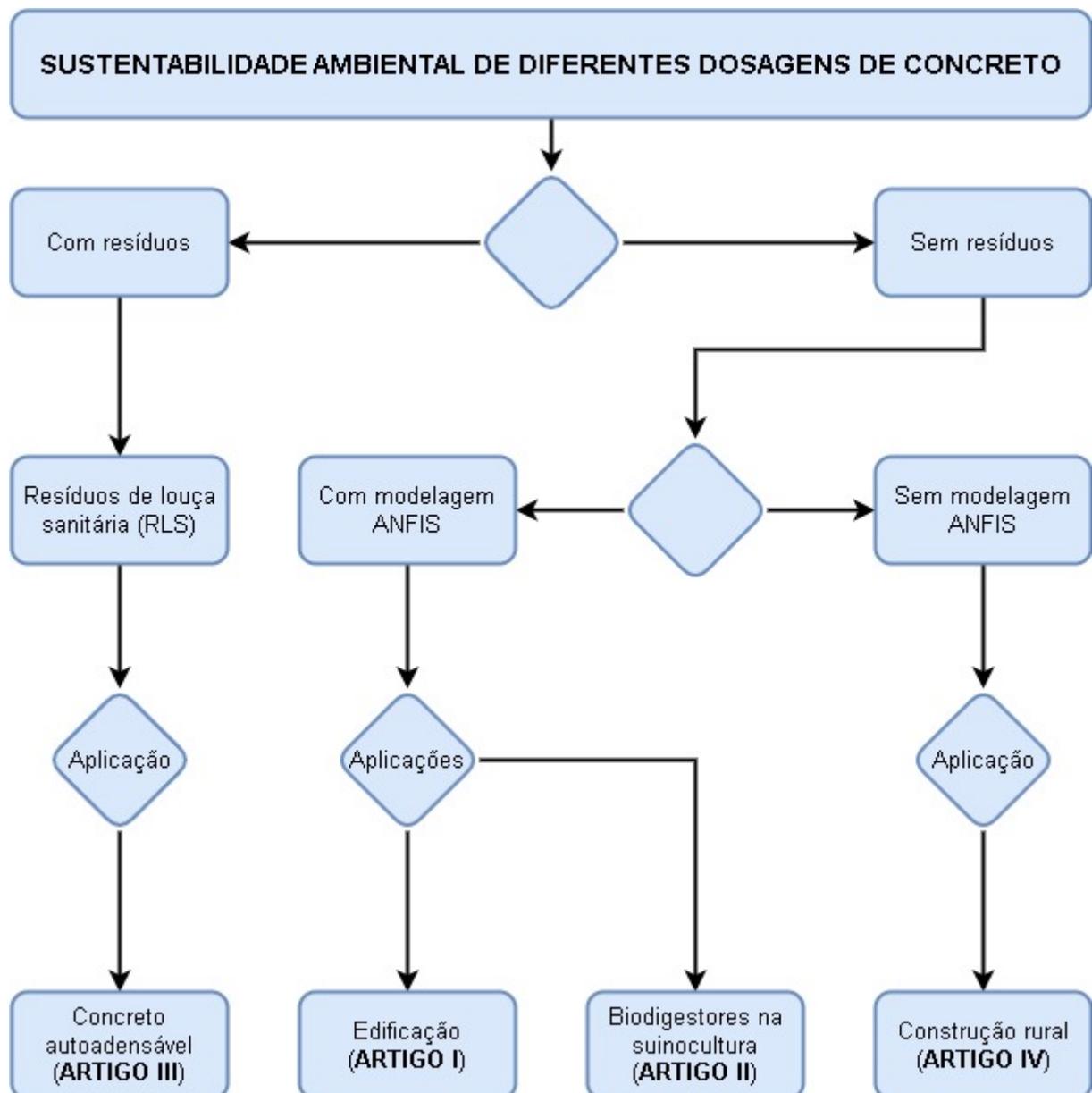
O estudo do impacto ambiental de ambientes edificados vai ao encontro de pesquisas recentes em engenharia agrícola, que buscam a sustentabilidade do sistema por meio da redução da demanda de energia e correspondentes emissões de CO₂, destacando-se os trabalhos de Ben-Alon et al. (2021), Li et al. (2021), Nematchoua, Sadeghi e Reiter (2021), Zhang e Zhang (2021) e Tang et al. (2022).

A importância do estudo de técnicas que visam a produção de construções sustentáveis, pode ser comprovada por uma continuidade e quantidade de publicações que reportam o uso de ferramentas para avaliação do impacto ambiental. Para Gong et al. (2012), projetar estruturas sustentáveis para economizar recursos e reduzir o impacto ambiental durante o ciclo de vida é uma necessidade que demanda atenção especial. Destarte, há instrumentos de decisão

consciente nas etapas de projeto e início de construção que podem influenciar e potencialmente reduzir os impactos ecossistêmicos associados.

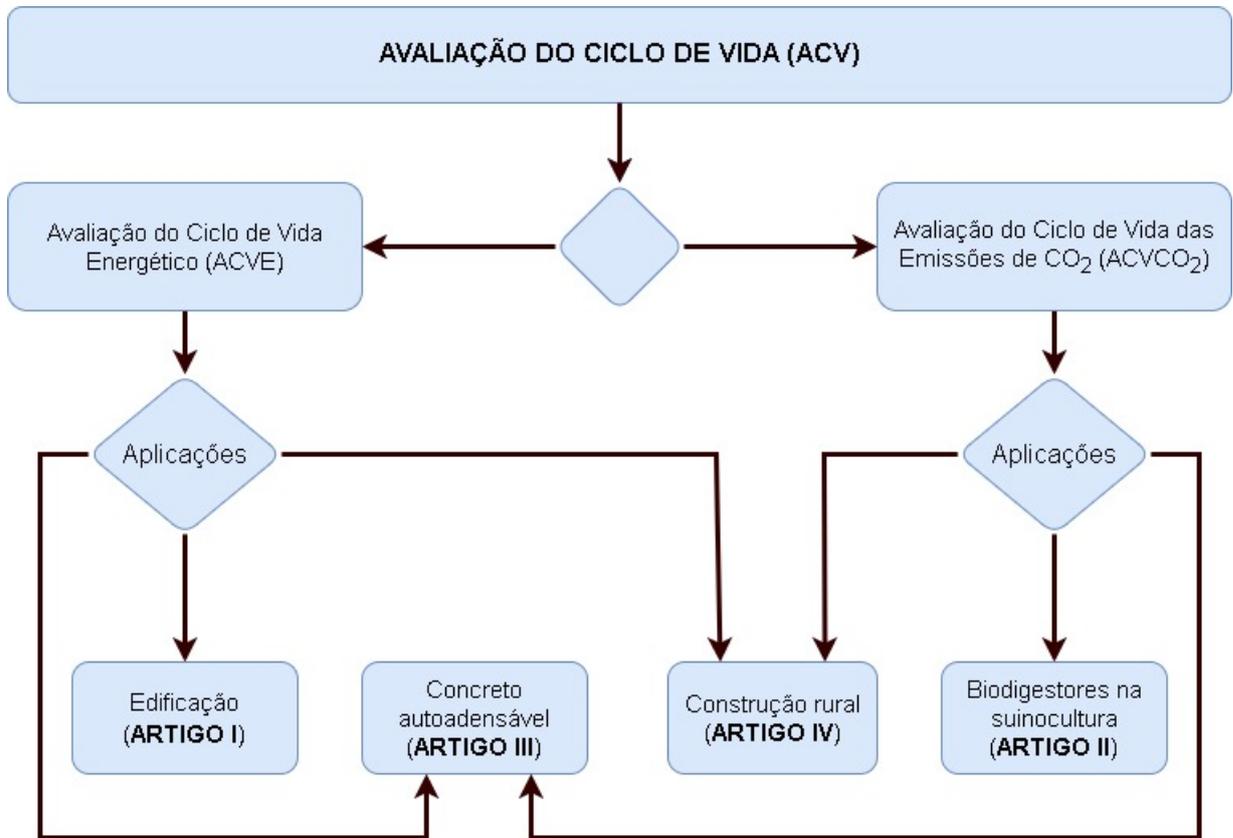
Dentro deste contexto, esta tese explorou a sustentabilidade ambiental de diferentes misturas de concreto, em diferentes abordagens, conforme representado na Figura 1.1, objetivos da seção 1.1 e organização estrutural da seção 1.3. Essas diferentes perspectivas foram trabalhadas sob à luz dos procedimentos da ACV, como apresentado na Figura 1.2. Ainda, esta pesquisa original destaca-se por observar a relação entre o comportamento ambiental e a influência do quantitativo dos materiais das dosagens de concretos.

Figura 1.1 – Sustentabilidade ambiental de diferentes dosagens de concreto (Estrutura de trabalho).



Fonte: Do autor (2023).

Figura 1.2 – Avaliação do ciclo de vida - Aplicações.



Fonte: Do autor (2023).

Desse modo, a hipótese fundamental desta tese é que a quantidade dos materiais incorporados em concretos pode ser estrategicamente escolhida para alcançar um melhor resultado no desenvolvimento sustentável de ambientes construídos. Ainda, a hipótese subjacente deste estudo é que o ANFIS funciona bem para prever o aporte energético e as emissões de CO₂ de diferentes misturas de concreto. Além do mais, conjecturou-se que a incorporação de resíduos de outros setores tem potencial para minimizar o impacto ambiental agregado em construções que empregam concretos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a sustentabilidade ambiental de diferentes misturas de concretos em distintos ambientes edificados.

1.1.2 Objetivos específicos

A partir do objetivo principal, os seguintes objetivos específicos foram definidos:

- Examinar a predição do consumo energético de diferentes dosagens de concreto para implantação de uma edificação utilizando ANFIS;
- Interpretar a relação entre o quantitativo dos materiais e o panorama ambiental de diferentes misturas de concretos;
- Analisar as emissões de CO₂ para distintas dosagens de concreto empregados na construção de biodigestores na suinocultura aplicando predições ANFIS;
- Investigar o ciclo de vida energético e das emissões de CO₂ dos materiais de diferentes dosagens de concreto no projeto de uma construção rural;
- Identificar correlações entre as variáveis e interpretar os fluxos energéticos e das emissões de CO₂ no campo das dosagens de concretos eficientes em relação ao comportamento sustentável;
- Avaliar a ecoeficiência da demanda energética e das emissões de dióxido de carbono (CO₂) em diferentes misturas de concretos autoadensáveis com substituição de agregado natural por Resíduo de Louça Sanitária (RLS);
- Evidenciar novas contribuições científicas para estudo do ciclo de vida energético e das emissões de CO₂ de diferentes dosagens de concretos.

1.2 Publicações

Esta seção apresenta as publicações produzidas ao longo desta pesquisa. Ao todo foram produzidos quatro artigos para periódicos científicos, dentre os quais dois foram publicados e dois estão em processo de avaliação para publicação, conforme elencados a seguir:

- I. DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; CAMPOS, A. T. **Modelo neuro-fuzzy para predição do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 295-309, 2021. (Publicado)

- II. DE SOUZA, R. M. et al. Modelo neuro-fuzzy para predição das emissões de CO₂ de dosagens de concreto para biodigestores na suinocultura.** Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 22, n. 4, p. 321–334, 2022. (Publicado)
- III. DE SOUZA, R. M. et al. Ecoeficiência de concretos autoadensáveis com resíduo de louça sanitária.** (Submetido)
- IV. DE SOUZA, R. M. et al. Avaliação do ciclo de vida de diferentes dosagens de concretos para uma habitação rural.** (Submetido)

No primeiro artigo o sistema ANFIS foi proposto como forma alternativa para predição de misturas de concreto com menor impacto na demanda de energia para a construção de uma edificação. O segundo artigo propõe o sistema ANFIS como uma ferramenta para predição e estudo das emissões de CO₂ de diferentes misturas de concreto para implantação de biodigestores na suinocultura. Na sequência, foi apresentado o terceiro artigo, que alvitrou o uso de avaliação combinada da demanda de energia e das emissões de dióxido de carbono CO₂ na análise ambiental de diferentes misturas de concretos autoadensáveis com a incorporação de RLS. Por fim, o quarto artigo da tese apresentou uma avaliação combinada do impacto ambiental da demanda energética e das emissões de carbono de diferentes misturas de concretos empregados na implantação de uma habitação rural.

1.3 Estrutura da tese

Esta tese está estruturada em duas partes. A primeira parte, **Conceituação geral**, foi organizada em três capítulos, conforme ordenado a seguir:

- O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral sobre o tema desenvolvido. Abordando os principais aspectos da pesquisa, bem como as hipóteses, os objetivos, a originalidade, a relevância e as publicações decorrentes desta pesquisa.
- O segundo capítulo aborda uma contextualização teórica, fundamentando pontos complementares para o entendimento deste trabalho.
- O terceiro capítulo apresenta um resumo das principais considerações observadas nesta pesquisa.

- Por último, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas nesta primeira parte da tese.

A segunda parte da tese, **Apresentação dos Artigos**, é composta por quatro artigos científicos, como disposto abaixo:

- Inicia-se pela apresentação do primeiro artigo, intitulado "Modelo neuro-fuzzy para predição do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações", de acordo com as normas do periódico científico Ambiente Construído da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), conforme foi aceito e publicado.
- Na sequência foi apresentado o segundo artigo, intitulado "Modelo neuro-fuzzy para predição das emissões de CO₂ de dosagens de concreto para biodigestores na suinocultura", de acordo com as normas do periódico científico Ambiente Construído da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), conforme foi aceito e publicado.
- Posteriormente, foi apresentado o terceiro artigo, intitulado "Ecoeficiência de concretos autoadensáveis com resíduo de louça sanitária", de acordo com as normas do periódico científico Ambiente Construído da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), conforme foi submetido.
- O fechamento da tese foi feito com a apresentação completa do quarto artigo, intitulado "Avaliação do ciclo de vida de diferentes dosagens de concretos para uma habitação rural", de acordo com as normas do periódico científico Revista Energia na Agricultura vinculada à Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"(UNESP), conforme foi submetido.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este item trata-se de uma fundamentação teórica de apoio, envolvendo conceitos introdutórios sobre o emprego de concreto em ambientes e os indicadores quantitativos dos impactos ambientais em concretos. Complementando estes temas uma seção foi dedicada aos sistemas adaptativos ANFIS.

2.1 Emprego de concreto em ambientes

Olhando para a história da humanidade, especialmente aquela escrita por obras de arquitetura e engenharia, é interessante constatar como as grandes mudanças na forma de construir se devem à descoberta de novos materiais estruturais e como o domínio do conhecimento sobre materiais estruturais marcaram o poder e o desenvolvimento das nações ao longo dos anos (HELENE; ANDRADE, 2010).

Segundo Helene e Andrade (2010), o concreto é um material de importância vital para a economia e o negócio da construção; um material fundamental para a arquitetura moderna; rico e versátil para escrever a história contemporânea por meio de monumentos originais e duráveis; e principalmente um material fundamental para o desenvolvimento da ciência aplicada, da engenharia e da qualidade de vida de um povo, o suficiente e indispensável para estar entre os prioritários investimentos, tanto nas grandes quanto nas pequenas nações.

Para se obter um concreto com determinadas características de desempenho, o primeiro passo é uma criteriosa seleção dos materiais componentes. O passo seguinte é o processo chamado dosagens do concreto, que significa obter a combinação correta de cimento, agregado, água, adições e aditivos, para produzir o concreto de acordo com as especificações dadas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Nas construções rurais, o concreto ocupa uma posição de evidência, podendo ser considerado um dos mais importantes materiais de construção. Esse material possui diferentes aplicações, dentre as quais podem-se citar: residências e refúgios rurais; instalações zootécnicas e ambiência; manilhas e tanques reservatórios para armazenamento e distribuição de água e efluentes; biodigestores; silos para armazenamentos de produtos agrícolas, insumos e grãos; galpões e outras instalações agrícolas; pisos em ambiências para produção animal; granjas; currais; bebedouros e cochos; pontes rurais e mata-burros. De acordo com Jacob et al. (2020), dependendo de sua aplicação, pode possuir diferentes tipos de composição e dosagem.

Conforme reportaram Mehta e Monteiro (2014), os motivos do concreto ser tão utilizado na engenharia são: excelente resistência do concreto de cimento Portland à água; amplo uso e facilidade com a qual os elementos estruturais podem ser moldados em diferentes formas e tamanhos; baixo custo (normalmente) e a rápida disponibilidade do material para uma obra.

Em mistura de concreto, o cimento Portland, misturado à água, forma uma pasta mais ou menos fluida, dependendo do percentual de água adicionado. Essa pasta envolve as partículas de agregados com diversas dimensões para produzir um material, que, nas primeiras horas, apresenta-se em um estado capaz de ser moldado nas mais variadas formas geométricas (HELENE; ANDRADE, 2010). Com o tempo, a mistura endurece pela reação irreversível da água com o cimento, adquirindo resistência mecânica capaz de torná-lo um material de excelente desempenho estrutural, sob os mais diversos ambientes de exposição.

O concreto de cimento Portland deve conter cimento, água e agregados, além da possibilidade de contar com aditivos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, cujos empregos tornam-se cada vez mais frequentes nos concretos. A proporção entre os diversos constituintes é buscada pela tecnologia do concreto, para atender simultaneamente às propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade requeridas para o concreto, além das características de trabalhabilidade necessárias para o transporte, lançamento e adensamento, condições estas que variam caso a caso (HELENE; ANDRADE, 2010).

Para Helene e Andrade (2010), em qualquer que seja o método de dosagem experimental utilizado, o resultado final é a proporção em massa dos diversos constituintes em relação à massa de cimento. Esta proporção é denominada de traço unitário em massa TUM:

$$1 : \text{adição} : a : b : a/c : \text{adt}_{1\%}$$

em que: 1 é a unidade de cimento, em massa, por exemplo 1 kg; *adição* é a quantidade em massa de adição pozolânica tipo escória granulada e moída de alto forno, metacaulim, sílica ativa, cinza de casca de arroz, etc; *a* é a quantidade em massa de agregado miúdo (areia) em relação à massa de cimento; *b* é a quantidade em massa de agregado graúdo (brita) em relação à massa de cimento; *a/c* é a relação entre água e cimento, ou entre água e aglomerantes, em massa; *adt*_{1%} é a relação entre massa de aditivo e a massa de cimento, em percentual.

Dessa forma, com o TUM pode-se obter a quantidade de qualquer determinado concreto, com as mesmas propriedades, tanto no estado fresco, quanto no endurecido, desde que se mantenham as proporções relativas entre os seus diversos constituintes. Ainda, é possível obter

os principais parâmetros de dosagem, tais como: o consumo de cimento, a relação água/materiais secos e o teor de argamassa seca. Estes parâmetros são de extrema importância para o Engenheiro e o Arquiteto terem melhor entendimento dos princípios que norteiam a tecnologia do concreto (HELENE; ANDRADE, 2010).

Embora a norma NBR - 6118 (ABNT, 2014) trate dos requisitos mínimos de qualidade das estruturas de concreto, identificados por três grupos distintos: capacidade resistente, desempenho em serviço e durabilidade. Desse modo, a escolha de qual mistura adotar pode ser mais ou menos impactante para o meio ambiente. Desse modo, a proposta holística de incorporação do parâmetro sustentabilidade ambiental na etapa de projeto pode conduzir para soluções que reduzam ou eliminem os impactos negativos dos ambientes construídos.

Diante desta explanação introdutória sobre o emprego de concreto, sem o intuito de esgotar as possibilidades de estudo do tema, recomenda-se (ISAIA, 2010; ISAIA, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014) para uma exploração mais ampla das propriedades, componentes e aplicações que não foram objeto de estudos nesta temática.

2.2 Indicadores de impactos ambientais em concretos

Apesar de parte população viver abaixo da linha de pobreza, a sociedade moderna consome mais do que consegue sustentar. De acordo com John (2011), um novo modelo de desenvolvimento, sustentável a longo prazo, precisa ser desenvolvido e implantado.

A sustentabilidade provoca mudanças fundamentais no conceito do fazer engenharia. Essa praxe incorpora os aspectos sociais, ambientais, técnicos e a viabilidade econômica. De forma mais abrangente, agrega no planejamento uma metodologia de produção considerando todo ciclo de vida do produto (JOHN, 2011).

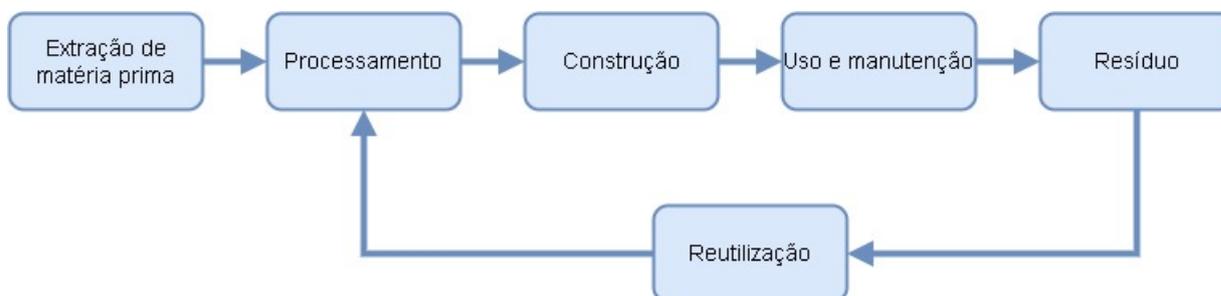
Com o concreto não é diferente, distintas perspectivas podem ser utilizadas para alcançar uma eficiência eco-sustentável. Apesar disso, um dos paradigmas a ser superado, está relacionado com o fluxo de vida do material ser em sua grande parte aberto, conforme Figura 2.1. Ou seja, os resíduos não são utilizados em sua totalidade na produção de novos produtos (Figura 2.2).

Figura 2.1 – Fluxo de vida dos concretos - Sistema de produção aberto.



Fonte: Adaptado de John (2011).

Figura 2.2 – Fluxo de vida dos concretos - Sistema de produção fechado.



Fonte: Adaptado de John (2011).

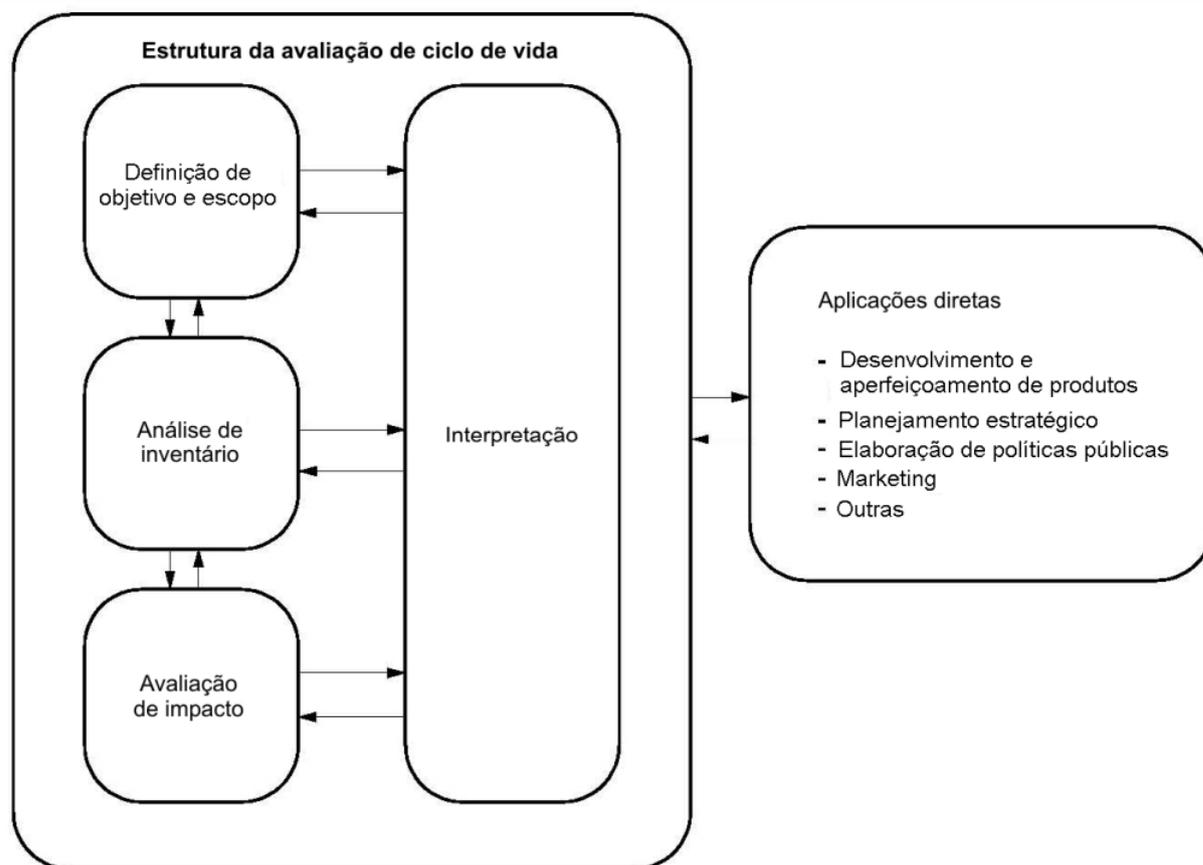
Diante da dualidade exclusivista apresentada nas Figuras 2.1 e 2.2, tem-se como alternativa uma abordagem de forma integrativa, pautada por considerações ecológicas, minimizando os impactos ambientais associados, reutilizando os resíduos e minimizando os rejeitos gerados. Para tanto, pode-se apoiar a tomada de decisão sustentável na metodologia de avaliação do ciclo de vida (ACV). Por meio da análise do ciclo de vida, produtos e processos podem ter seus impactos ambientais quantificados, procedimento abordado nas normas NBR ISO da série 14000.

Para John (2011), essa ferramenta está baseada em um inventário quantitativo dos fluxos de materiais e energia envolvidos ao longo de todo o ciclo de vida do produto, da extração de matérias primas até a destinação final. Envolve, portanto, a medida do consumo de matérias primas, água, energia, bem como as emissões para o solo, atmosfera e geração de resíduos para o que se chama de "unidade funcional do produto". O sistema pode ser pensado como a contabilidade ambiental do produto.

Para a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009), ACV é a compilação e avaliação das entradas, saídas e dos impactos ambientais potenciais de um sistema de produto ao longo do seu ciclo de vida. A ACV está estruturada em: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto, e interpretação (Figura 2.3). Os resultados da ACV podem ser subsídios úteis para uma variedade de processos decisórios e aplicações diretas.

Recentemente, o Brasil avançou na ciência nacional da ACV dos materiais de construção, com o advento do Sistema de Informação do Desempenho Ambiental da Construção (SIDAC), ferramenta *web* para cálculo do impacto ambiental na energia e nas emissões de carbono para produtos de construção fabricados no Brasil. Plataforma concebida a partir de uma visão holística e participativa, que envolveu diferentes atores, entre eles: o Ministério de Minas e Energia (MME), o Ministério de Desenvolvimento Regional (MDR), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Eletrobras (Centrais Elétricas Brasileiras S.A.), o Programa Nacional de

Figura 2.3 – Dinâmica entre as fases de uma ACV.



Fonte: NBR ISO 14040 (ABNT, 2009).

Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (CBCS), a Agência Alemã de Cooperação Internacional (GIZ), associações de fabricantes de materiais, projetistas e construtoras, entidades ligadas à pesquisa, à inovação e à sustentabilidade, além de especialistas em ACV.

Para Silva e Kulay (2006), a Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) consiste no exame do sistema de produto, do ponto de vista ambiental, a partir dos dados do inventário. Isso é feito por meio da análise dos potenciais impactos ambientais associados aos aspectos ambientais identificados na etapa de análise do inventário. Nesta etapa, busca-se delimitar quais as categorias de impacto ambiental serão consideradas. Dentre as opções usuais, tem-se:

- *consumo de recursos naturais*: inclui recursos materiais e energéticos, tanto renováveis quanto não-renováveis;
- *aquecimento global (também conhecido por efeito estufa)*: é provocado pelo acúmulo, na atmosfera, de determinados gases (por exemplo, gás carbônico e metano) que retêm parte

da radiação infravermelha emitida pela Terra, provocando o aumento das temperaturas médias globais.

- *redução da camada de ozônio*: consiste na redução da quantidade de ozônio (O₃) presente na estratosfera, por reação com alguns gases (como halocarbonos: CFC11, CFC12, etc.), provocando a diminuição da capacidade que essa camada tem de filtração da radiação ultravioleta proveniente do Sol;
- *acidificação*: consiste no aumento do teor de acidez da atmosfera provocado pela emissão de gases ácidos, tais como óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio, que são dissolvidos pela umidade atmosférica e retornam à crosta terrestre na forma de ácidos;
- *eutrofização (ou nutrificação)*: consiste no acúmulo dos nutrientes nitrogênio e fósforo nos corpos d'água e nos solos, em decorrência da disposição de rejeitos que contêm esses elementos químicos;
- *formação fotoquímica de ozônio*: consiste na formação de ozônio nas camadas baixas da atmosfera por reações químicas entre óxidos de nitrogênio e alguns hidrocarbonetos leves (resultantes de emissões), em presença da radiação ultravioleta solar; e
- *toxicidade*: resultante da disposição de rejeitos tóxicos no meio ambiente; em geral, são consideradas em separado a toxicidade humana e a assim chamada ecotoxicidade, que pode ser aquática e terrestre.

E, em se tratando do material concreto, dentre diferentes perspectivas quantitativas dos impactos ambientais, atenção especial deve-se dar ao aporte energético dos recursos materiais adotados e às correspondentes emissões de CO₂, por meio das ferramentas simplificadas de ACVE e ACVCO₂. Abordando dessa forma o uso de recursos naturais e seu impacto no aquecimento global. Detalhes do processo metodológico da ACV podem ser explorados nas normas NBR ISO da série 14000.

São consideráveis às implicações positivas da ACVE e da ACVCO₂ na investigação da sustentabilidade ambiental de sistemas (OLIVEIRA; PACCA; JOHN, 2016; SMITH; DURHAM, 2016; MACK-VERGARA; JOHN, 2017; LI et al., 2019; LUO; CHEN, 2020; GHAYEB; RAZAK; SULONG, 2020; LI et al., 2020; MANJUNATHA et al., 2021; PAKDEL; AYATOLLAHI; SATTARY, 2021; LI et al., 2021; CASCIONE et al., 2022).

Bostanci, Ajogi e Kew (2023) relataram que a indústria do concreto visa mitigar sua pegada ambiental e fornecer abordagens econômicas para a promoção de objetivos de desenvolvimento sustentável. Para o relatório do SIDAC (COSTA REIS; JOHN, 2022), as emissões de carbono e a demanda energética são instrumentos fundamentais para avaliação da sustentabilidade ambiental de concretos. Conforme realizado por Mithun e Narasimhan (2016), para cada um dos materiais adotados em uma unidade funcional de 1 m³ de concreto, pode-se obter os quantitativos das emissões de CO₂ pela Equação 2.1 e do aporte energético pela Equação 2.2. Ou seja, os cálculos dos impactos ambientais podem ser observados em função de cada material da mistura e ao final o valor total da unidade funcional pela soma dos valores individuais.

$$\mathbf{CI} = \mathbf{Massa}_{Material} \times \mathbf{CI}_{Material} \quad (2.1)$$

em que: **CI** é o montante de massa de dióxido de carbono emitido (kg de CO₂); **Massa_{Material}** é a massa do material (densidade x volume) (kg); **CI_{Material}** corresponde ao valor das emissões de dióxido de carbono em relação à unidade de massa (kg de CO₂/kg).

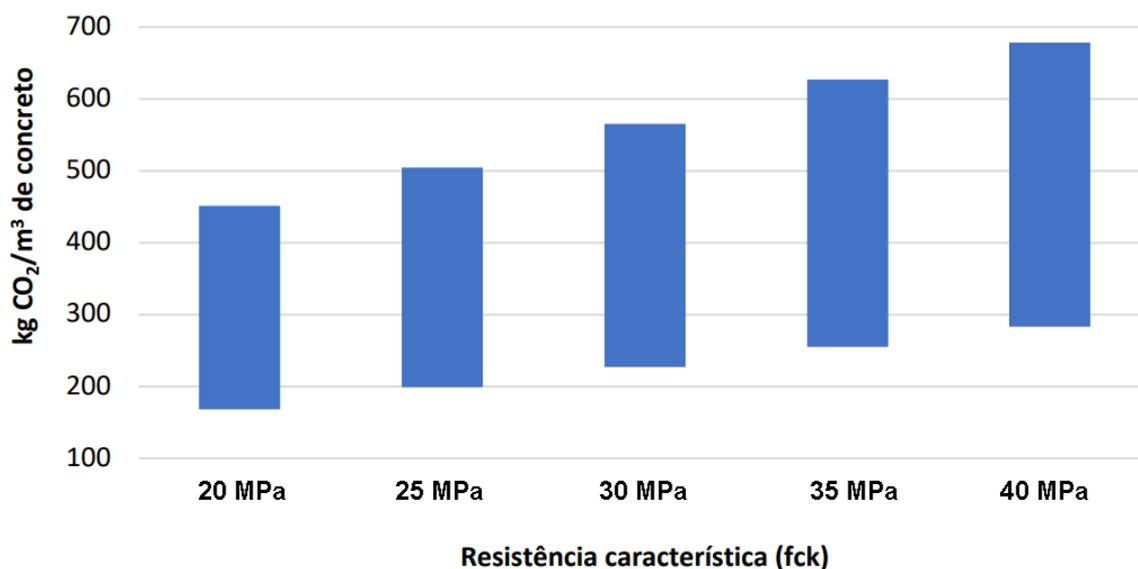
$$\mathbf{EI} = \mathbf{Massa}_{Material} \times \mathbf{EI}_{Material} \quad (2.2)$$

onde: **EI** é o montante de energia incorporada (MJ); **Massa_{Material}** é a massa do material (densidade x volume) (kg); **EI_{Material}** corresponde ao valor de energia incorporada ao material em relação à unidade de massa (MJ/kg).

Pesquisas em engenharia agrícola avaliaram a sustentabilidade de sistemas por meio da quantificação dos indicadores de energia incorporada e das emissões de CO₂ (CLARK; KHOSHNEVISAN; SEFEEDPARI, 2016; MOUSAVI-AVVAL et al., 2017; D’ALESSANDRO et al., 2017; NABAVI-PELESARAEI et al., 2018; MATTIOLI et al., 2018a; MATTIOLI et al., 2018b; FATHOLLAHI et al., 2018; SALMORAL; YAN, 2018; ELHAMI; RAINI; SOHEILI-FARD, 2019; VELOSO et al., 2019; JAT et al., 2020; TAHSILDOOST; ZOMORODIAN, 2020; HUSEIEN; SHAH, 2020; DEHKORDI; FOROOTAN, 2020; PENG; YANG; SCHEFFRAN, 2021; OZTURK et al., 2022).

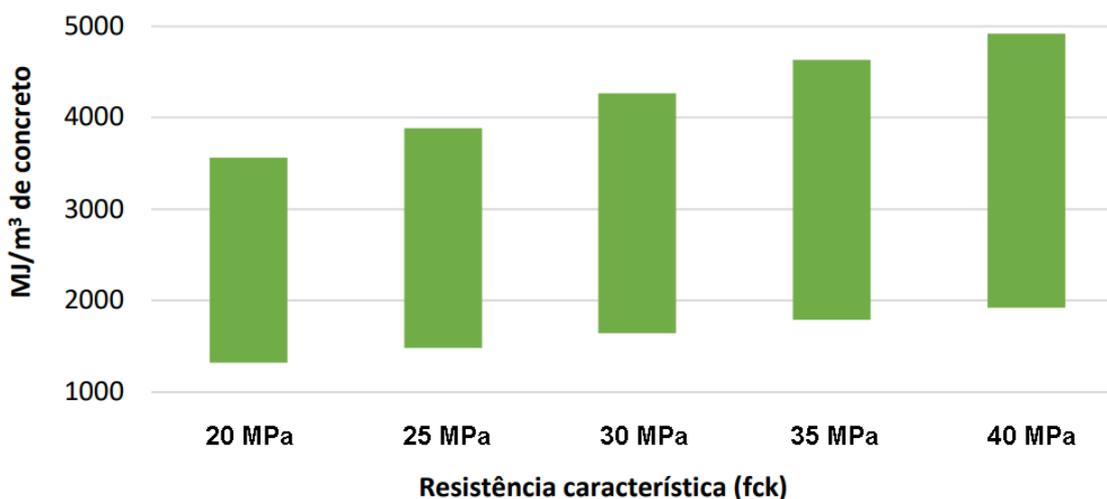
De acordo com o inventário da SIDAC (COSTA REIS; JOHN, 2022), em função da resistência característica à compressão (f_{ck}) do concreto considerando a fronteira do sistema do berço ao portão, observou-se o comportamento das emissões de CO₂ e a demanda de energia primária de concretos produzidos em central dosadora (Figuras 2.4 e 2.5).

Figura 2.4 – Emissões de dióxido de carbono na produção de concreto dosado em central.



Fonte: Costa Reis e John (2022).

Figura 2.5 – Demanda de energia do concreto dosado em central.



Fonte: Costa Reis e John (2022).

As Figuras 2.4 e 2.5 mostram como o cenário ambiental das dosagens pode apresentar variações significativas para uma mesma faixa de resistência mecânica f_{ck} e como escolhas tecnológicas podem servir de apoio ao desenvolvimento de dosagens que minimizem os impactos ambientais e viabilizem a sustentabilidade ambiental de concretos.

Quando se comparam produtos à tomada de decisão baseada na ACV não é uma tarefa direta, por exemplo, uma das alternativas pode apresentar menor impacto ambiental para o aquecimento global gerando muitos resíduos, enquanto outra gera menor quantidade de resíduos, embora tenha grande contribuição para o aquecimento global (JOHN, 2010). Assim,

Bostanci, Ajogi e Kew (2023) relataram que a utilização de resíduos na produção de concreto pode satisfazer as necessidades de sustentabilidade.

De acordo com Angulo e Figueiredo (2011), concretos com agregados reciclados são produzidos com resíduos britados, em substituição parcial ou total aos agregados convencionais, oriundos de rochas britadas, seixos e areias lavadas de rio. De fato muitas pesquisas relataram benefícios da utilização de agregados reciclados (NIKBIN et al., 2018; RASHID; YAZDAN-BAKSHI; REHMAN, 2019; FONT et al., 2020; XING et al., 2022; SALAHADDIN; HAIDO; WARDEH, 2022; LIU et al., 2022; ALANI; AL-JUMAILY; HILAL, 2022; HAMIDIAN et al., 2022). Bostanci, Ajogi e Kew (2023) reportaram que o desempenho das misturas de concreto com resíduos não é totalmente claro, o que reforça a necessidade de mais pesquisas sobre o tema.

2.3 Sistema adaptativo neuro-fuzzy

A modelagem neuro-fuzzy é considerada uma ferramenta poderosa no desenvolvimento de sistemas fuzzy, principalmente do tipo Takagi-Sugeno-Kang (TSK). Sua utilidade é evidente quando lidamos com sistemas fortemente não-lineares, de comportamento variável no tempo (OLIVEIRA Jr. et al., 2007). A ideia fundamental é simples:

Os modelos neuro-fuzzy nada mais são que representações de sistemas fuzzy (formulados por meio de regras fuzzy do tipo IF - THEN) na forma de redes (ou grafos direcionados) passíveis de treinamento por técnicas similares às usadas em redes neurais artificiais. Tal estrutura viabiliza a adaptação do sistema fuzzy sob treinamento a dado *training set*, de modo que, ao final, obtenhamos resultados interpretáveis, ao contrário dos casos típicos das redes neurais artificiais, de difícil interpretação por humanos. Embora possamos utilizar essa técnica em diversos tipos de sistemas fuzzy, os casos práticos são predominantemente do tipo TSK (OLIVEIRA Jr. et al., 2007).

Dentre os sistemas neuro-fuzzy do tipo TSK, o sistema ANFIS é o mais difundido na literatura. Em resumo, um sistema ANFIS busca implementar um modelo fuzzy do tipo TSK numa rede neural.

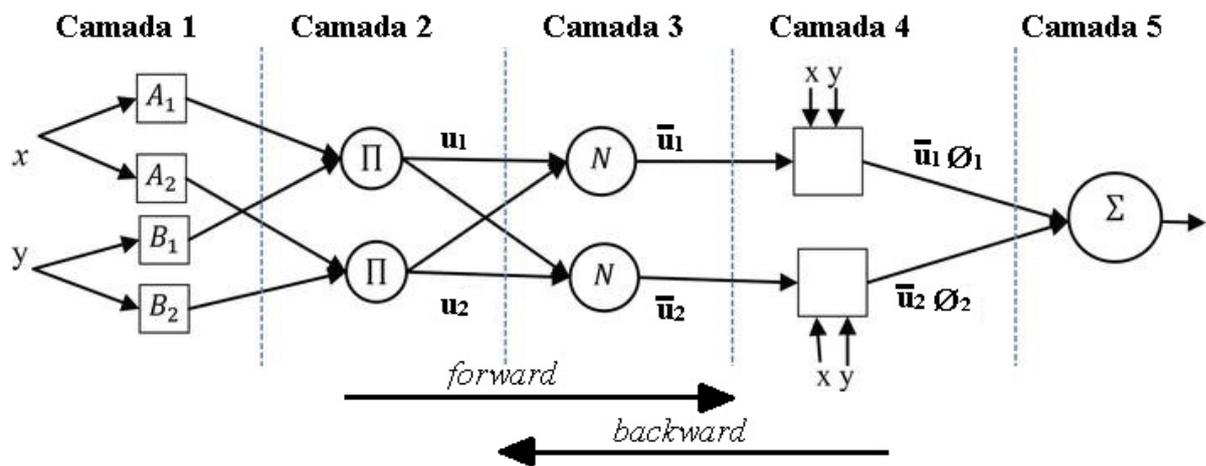
Nos moldes propostos por Oliveira Jr. et al. (2007), para efeito descritivo, sem perda de generalidade, considere um modelo ANFIS de primeira ordem com duas regras (Equações 2.3 e 2.4) e correspondente Figura 2.6.

$$\mathbf{IF} \quad x = A_1 \quad \mathbf{and} \quad y = B_1 \quad \mathbf{THEN} \quad \phi_1 = \phi_{1,1}x + \phi_{1,2}y + \phi_{1,3} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{IF} \quad x = A_2 \quad \mathbf{and} \quad y = B_2 \quad \mathbf{THEN} \quad \phi_2 = \phi_{2,1}x + \phi_{2,2}y + \phi_{2,3} \quad (2.4)$$

onde: x e y são as variáveis de entradas; A_i e B_i são as rótulos linguísticos associados às variáveis de entrada; $\phi_{i,1}$, $\phi_{i,2}$ e $\phi_{i,3}$ são os parâmetros consequentes que são identificados no processo de formação; e ϕ_i são as saídas do sistema.

Figura 2.6 – Arquitetura do sistema ANFIS.



Fonte: Adaptado de Oliveira Jr. et al. (2007).

A arquitetura padrão do sistema ANFIS é estruturada em cinco camadas, com duas variáveis de entrada e uma única resposta de saída. Cada nó dentro da mesma camada executa a mesma função. Os círculos são usados para indicar nós fixos enquanto os quadrados são adotados para denotar nós adaptativos. As funções de cada camada são brevemente apresentadas a seguir:

Camada 1 - fuzzification: As saídas das unidades desta camada são os valores de pertinência das entradas em relação aos termos (conjuntos fuzzy) nas premissas das regras (Equações 2.5 e 2.6). As funções de pertinência fuzzy podem assumir diferentes formas, como triangular, trapezoidais ou gaussianas (TRANG, 2020). As funções de pertinência são escolhidas automaticamente através de aprendizado neuro-adaptativo (CHAVES, 2013).

$$o_{1,i} = \mu_{A_i}(x) \quad i = 1, 2 \quad (2.5)$$

$$o_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(y) \quad i = 3, 4 \quad (2.6)$$

em que: $o_{1,i}$ denota a saída da nó i na camada 1; $\mu_{A_i}(x)$ e $\mu_{B_{i-2}}(y)$ são os valores de pertinência das entradas.

Camada 2 - rules activation: As saídas das unidades desta camada são os valores de ativação das regras. Haverão tantas unidades na camada 2 quanto o número de regras e o Π realiza a função de um operador conjuntivo nos sistemas fuzzy, agregando as saídas das camadas anteriores. Geralmente, o operador-produto é utilizado, o que permite que o sistema seja continuamente diferenciável favorecendo a otimização dos parâmetros, conforme Equação 2.7.

$$o_{2,i} = u_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \quad (2.7)$$

em que: $o_{2,i}$ é a resposta do nó i na camada 2; u_i representa o grau de ativação de cada regra.

Camada 3 - normalization: As saídas das unidades desta camada são os valores normalizados dos valores de ativação das regras (Equação 2.8).

$$o_{3,i} = \bar{u}_i = \frac{u_i}{u_1 + u_2} \quad i = 1, 2 \quad (2.8)$$

em que: $o_{3,i}$ corresponde à resposta do nó i na camada 3; \bar{u}_i é o grau de ativação das regras normalizado.

Camada 4 - defuzzification: As saídas das unidades desta camada representam a contribuição de cada regra na saída total e são calculadas pelo valor da função no consequente da regra ponderada pelo valor normalizado de ativação da regra (Equação 2.9).

$$o_{4,i} = \bar{u}_i \cdot \phi_i = \bar{u}_i \cdot (\phi_{i,1}x + \phi_{i,2}y + \phi_{i,3}) \quad i = 1, 2 \quad (2.9)$$

onde: $o_{4,i}$ é o valor do nó i na camada 4; \bar{u}_i é a saída da camada 3; $\phi_{i,1}$, $\phi_{i,2}$ e $\phi_{i,3}$ são os parâmetros associados aos consequentes das regras.

Camada 5 - a single summation node: A saída parcial de cada regra é somada para cálculo da saída total, produzindo a saída do modelo TSK definido pela regra da Equação 2.10.

$$o_{5,i} = \sum_i^n \bar{u}_i \cdot \phi_i \quad (2.10)$$

em que: $o_{5,i}$ é a resposta do nó i na camada 5. O resultado corresponde à média ponderada de todas as saídas das regras (TRANG, 2020).

Para Sharma (2015) e Trang (2020), o objetivo do algoritmo de aprendizado híbrido na arquitetura ANFIS é ajustar todos esses parâmetros para fazer com que a saída corresponda aos dados de treinamento. Ajustar os parâmetros inclui dois passos. De acordo com Chaves (2013), na primeira etapa (*forward*), os parâmetros dos antecedentes são fixos e os parâmetros dos consequentes são determinados via algoritmo dos mínimos quadrados. Na segunda etapa (*backward*), os sinais de erro são retropropagados e os parâmetros dos antecedentes são atualizados via o método do gradiente descendente (retropropagação).

Os tópicos discutidos neste capítulo podem ser aprofundados nos livros de Rezende (2003), Simões e Shaw (2007) e Oliveira Jr. et al. (2007). Existe uma vasta gama de publicações em outros idiomas, dentre esses Jang, Sun e Mizutani (1997). Do ponto de vista comercial, as ferramentas *Neural Network Toolbox* e *Fuzzy Logic Toolbox* do software MATLAB são comumente utilizadas em simulações de redes neurais, fuzzy e neuro-fuzzy.

Outro aspecto digno de nota, refere-se aos bons resultados preditivos de sistemas ANFIS na avaliação ambiental de diferentes cenários (LI; SU; CHU, 2011; AL-GHANDOOR, 2013; TAGHAVIFAR; MARDANI, 2014; KHOSHNEVISAN et al., 2014; OLATOMIWA et al., 2015; SHAMSHIRBAND et al., 2015; SALEH et al., 2016; NILASHI et al., 2018; KAAB et al., 2019; ZEINALNEZHAD et al., 2020).

3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de investigar o comportamento sustentável de diferentes misturas de concreto em ambientes edificados. Os estudos indicaram um aumento progressivo na produção de ambientes edificados destinados a abrigar atividades humanas, agrícolas e industriais, incremento este que impulsionou avanços na tecnologia do concreto, bem como o estudo dos impactos ambientais gerados pelo uso desse material de construção.

A fim de avaliar a sustentabilidade do concreto, diferentes metodologias e ferramentas computacionais foram propostas nos últimos anos. Neste propósito, esta tese buscou a ACV de concretos em projetos sustentáveis de ambientes construídos. Para tanto, dentro desse universo, modelos computacionais baseados em neuro fuzzy foram desenvolvidos para predições da demanda de energia incorporada e da emissão de dióxido de carbono. Os resultados indicaram que o modelo ANFIS pode ser uma boa alternativa para o projeto de dosagens de concreto, especialmente nos cenários das edificações e dos biodigestores na suinocultura. Podendo, dessa forma, auxiliar na tomada de decisão em relação a determinação do quantitativo ideal de cada um dos componente empregados na produção de concretos ecologicamente mais sustentáveis. Por outro lado, a pesquisa também identificou o potencial sustentável do uso de RLS na substituição de agregado natural.

Assim, concluiu-se que existem diferentes possibilidades de projetar dosagens de concreto e que com a escolha adequada é possível alcançar reduções significativas no impacto ambiental associado. Além disso, os resultados prospectivos dessa tese, podem servir como prognóstico para um uso sistêmico da metodologia em centrais dosadoras de concreto, com possibilidade de atenuação dos impactos ambientais.

Por fim, sugere-se uma nova terminologia para o campo de estudo ambiental das dosagens, denominada "***Projeto da Sustentabilidade de Dosagens de Concreto***", que consiste em estabelecer os parâmetros ambientais e o proporcionamento dos diversos constituintes de forma consciente e tecnológica para o ciclo de vida do concreto, com o objetivo de fornecer soluções ecologicamente mais sustentáveis para aplicações pré-estabelecidas.

REFERÊNCIAS

- AKHTAR, M. N. et al. Incorporation of recycled aggregates and silica fume in concrete: An environmental savior—a systematic review. **Journal of Materials Research and Technology**, Elsevier, v. 20, p. 4525–4544, 2022.
- AL-GHANDOOR, A. An approach to energy savings and improved environmental impact through restructuring Jordan's transport sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 18, p. 31–42, 2013.
- ALANI, N. Y.; AL-JUMAILY, I. A.; HILAL, N. Performance of self-compacting concrete containing nano clay at elevated temperatures and $MgSO_4$ attack. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, Taylor and Francis, p. 1–19, 2022.
- ANGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. de. Concreto com agregados reciclados. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1731–1767.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida — princípio e estrutura. Rio de Janeiro, 2009. 21 p. Esta versão corrigida da ABNT NBR 14040:2009 incorpora a Errata 1 de 21.07.2014. Confirmada em 12.09.2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2014. 238 p. Esta versão corrigida da ABNT NBR 6118:2014 incorpora a Errata 1 de 07.08.2014. Confirmada em 30.11.2018.
- BARAK, S.; SADEGH, S. S. Forecasting energy consumption using ensemble ARIMA–ANFIS hybrid algorithm. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 82, p. 92–104, 2016.
- BEN-ALON, L. et al. Life cycle assessment (LCA) of natural vs conventional building assemblies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 144, p. 110951, 2021.
- BOSTANCI, S. C.; AJOGI, E. I.; KEW, H. Waste coal cement concrete for sustainable production. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, Taylor and Francis, v. 0, n. 0, p. 1–25, 2023.
- CASCIONE, V. et al. Integration of life cycle assessments (LCA) in circular bio-based wall panel design. **Journal of Cleaner Production**, v. 344, p. 130938, 2022.
- CHAVES, L. E. **Modelos computacionais fuzzy e neuro-fuzzy para avaliarem os efeitos da poluição do ar**. Tese de Doutorado — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.
- CHEN, H.-Y.; LEE, C.-H. Electricity consumption prediction for buildings using multiple adaptive network-based fuzzy inference system models and gray relational analysis. **Energy Reports**, Elsevier, v. 5, p. 1509–1524, 2019.
- CLARK, S.; KHOSHNEVISAN, B.; SEFEEDPARI, P. Energy efficiency and greenhouse gas emissions during transition to organic and reduced-input practices: Student farm case study. **Ecological Engineering**, Elsevier, v. 88, p. 186–194, 2016.

COSTA REIS, D.; JOHN, V. Relatório de coleta de dados para o sistema de informação do desempenho ambiental da construção: Concreto. **SIDAC**, São Paulo, 2022.

D'ALESSANDRO, F. et al. Straw bale constructions: Laboratory, in field and numerical assessment of energy and environmental performance. **Journal of Building Engineering**, v. 11, p. 56–68, 2017.

DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; DE ANDRADE, E. T. Comparative study of non-linear simulations of a reinforced concrete slender column using finite element method and p-delta. **Theoretical and Applied Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–11, 2019.

DEHKORDI, A. L.; FOROOTAN, M. Estimation of energy flow and environmental impacts of quinoa cultivation through life cycle assessment methodology. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer Science and Business Media LLC, 2020.

DELNAVAZ, M. et al. Production of concrete using reclaimed water from a ready-mix concrete batching plant: Life cycle assessment (LCA), mechanical and durability properties. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 45, p. 103560, 2022.

DISSANAYAKE, D. M.; JAYASINGHE, C.; JAYASINGHE, M. T. R. A comparative embodied energy analysis of a house with recycled expanded polystyrene (EPS) based foam concrete wall panels. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 135, p. 85–94, 2017.

ELHAMI, B.; RAINI, M. G. N.; SOHEILI-FARD, F. Energy and environmental indices through life cycle assessment of raisin production: A case study (Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province, Iran). **Renewable Energy**, Elsevier, v. 141, p. 507–515, 2019.

FATHOLLAHI, H. et al. Comparative energy, economic and environmental analyses of forage production systems for dairy farming. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 182, p. 852–862, 2018.

FONT, A. et al. One-part eco-cellular concrete for the precast industry: Functional features and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 269, p. 122203, 2020.

GHAYEB, H. H.; RAZAK, H. A.; SULONG, N. H. Evaluation of the CO₂ emissions of an innovative composite precast concrete structure building frame. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 242, p. 118567, 2020.

GONG, X. et al. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing: A comparative study. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, n. 4, p. 576–587, 2012.

HAMIDIAN, P. et al. Introduction of a novel evolutionary neural network for evaluating the compressive strength of concretes: A case of rice husk ash concrete. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 61, p. 105293, 2022.

HELENE, P.; ANDRADE, T. Concreto de cimento portland. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 2, p. 945–984.

HUSEIEN, G. F.; SHAH, K. W. Durability and life cycle evaluation of self-compacting concrete containing fly ash as GBFS replacement with alkali activation. **Construction and Building Materials**, v. 235, p. 117458, 2020.

ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 1 e 2.

ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1 e 2.

JACOB, J. de S. et al. **Qualidade de piso de concreto para a suinocultura**: Comunicado Técnico 574. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2020.

JALLAL, M. A. et al. A hybrid neuro-fuzzy inference system-based algorithm for time series forecasting applied to energy consumption prediction. **Applied Energy**, Elsevier, v. 268, p. 114977, 2020.

JANG, J. R.; SUN, C.; MIZUTANI, E. Neuro-fuzzy and soft computing-a computational approach to learning and machine intelligence [book review]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, IEEE, v. 42, n. 10, p. 1482–1484, 1997.

JAT, H. et al. Energy use efficiency of crop residue management for sustainable energy and agriculture conservation in NW India. **Renewable Energy**, v. 155, p. 1372 – 1382, 2020.

JOHN, V. M. Materiais de construção e o meio ambiente. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de Construção e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 1, p. 97–122.

JOHN, V. M. Concreto sustentável. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, p. 1843–1869.

JOKAR, Z.; MOKHTAR, A. Policy making in the cement industry for CO₂ mitigation on the pathway of sustainable development- a system dynamics approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 142–155, 2018.

KAAB, A. et al. Combined life cycle assessment and artificial intelligence for prediction of output energy and environmental impacts of sugarcane production. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 664, p. 1005–1019, 2019.

KHOSHNEVISAN, B. et al. Evaluation of traditional and consolidated rice farms in Guilan Province, Iran, using life cycle assessment and fuzzy modeling. **Science of The Total Environment**, Elsevier, v. 481, p. 242–251, 2014.

LI, D. et al. Estimating life-cycle CO₂ emissions of urban road corridor construction: A case study in Xi'an, China. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 255, p. 120033, 2020.

LI, H. et al. Assessing the life cycle CO₂ emissions of reinforced concrete structures: Four cases from China. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 210, p. 1496–1506, 2019.

LI, H. et al. Assessing the embodied carbon reduction potential of straw bale rural houses by hybrid life cycle assessment: A four-case study. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 303, p. 127002, 2021.

LI, K.; SU, H.; CHU, J. Forecasting building energy consumption using neural networks and hybrid neuro-fuzzy system: A comparative study. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 43, n. 10, p. 2893–2899, 2011.

LIU, Y. et al. Roles of enhanced ITZ in improving the mechanical properties of concrete prepared with different types of recycled aggregates. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 60, p. 105197, 2022.

LU, J. X. et al. A novel high-performance lightweight concrete prepared with glass-UHPC and lightweight microspheres: Towards energy conservation in buildings. **Composites Part B: Engineering**, Elsevier, v. 247, p. 110295, 2022.

LUO, L.; CHEN, Y. Carbon emission energy management analysis of LCA - based fabricated building construction. **Sustainable Computing: Informatics and Systems**, Elsevier, v. 27, p. 100405, 2020.

MACK-VERGARA, Y. L.; JOHN, V. M. Life cycle water inventory in concrete production—a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 122, p. 227–250, 2017.

MANJUNATHA, M. et al. Life cycle assessment (LCA) of concrete prepared with sustainable cement-based materials. **Materials Today: Proceedings**, Elsevier, v. 47, p. 3637–3644, 2021.

MATTIOLI, M. C. et al. Demanda energética na construção de galpão para frangos de corte modelo darkhouse. **Energia na Agricultura**, v. 33, n. 3, p. 216–223, 2018.

MATTIOLI, M. C. et al. Energy analysis of broiler chicken production system with darkhouse installation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 9, p. 648–652, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. Versão atualizada, com base na quarta edição em inglês.

MINNU, S.; BAHURUDEEN, A.; ATHIRA, G. Comparison of sugarcane bagasse ash with fly ash and slag: An approach towards industrial acceptance of sugar industry waste in cleaner production of cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 285, p. 124836, 2021.

MITHUN, B.; NARASIMHAN, M. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 837–844, 2016.

MOHSENI pour asl, J. et al. An experimental investigation into the mechanical performance and microstructure of cementitious mortars containing recycled waste materials subjected to various environments. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 61, p. 105275, 2022.

MOUSAVI-AVVAL, S. H. et al. Combined application of life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system for modeling energy and environmental emissions of oilseed production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 807 – 820, 2017.

NABAVI-PELESARAEI, A. et al. Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of paddy production. **Science of the Total Environment**, v. 631-632, p. 1279–1294, 2018.

NABAVI-PELESARAEI, A. et al. Comprehensive model of energy, environmental impacts and economic in rice milling factories by coupling adaptive neuro-fuzzy inference system and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 217, p. 742–756, 2019.

NAJI, S. et al. Application of adaptive neuro-fuzzy methodology for estimating building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1520–1528, 2016.

NASERI, H. et al. Designing sustainable concrete mixture by developing a new machine learning technique. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 258, p. 120578, 2020.

NEMATCHOUA, M. K.; SADEGHI, M.; REITER, S. Strategies and scenarios to reduce energy consumption and CO₂ emission in the urban, rural and sustainable neighbourhoods. **Sustainable Cities and Society**, Elsevier, v. 72, p. 103053, 2021.

NIKBIN, I. M. et al. Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud). **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 172, p. 2683–2694, 2018.

NILASHI, M. et al. Measuring country sustainability performance using ensembles of neuro-fuzzy technique. **Sustainability**, MDPI AG, v. 10, n. 8, p. 2707, 2018.

OLATOMIWA, L. et al. Adaptive neuro-fuzzy approach for solar radiation prediction in Nigeria. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 1784–1791, 2015.

OLIVEIRA Jr., H. A. et al. **Inteligência Computacional Aplicada a Administração, Economia e Engenharia em MATLAB**. Rio de Janeiro: Thompson, 2007.

OLIVEIRA, L. S.; PACCA, S. A.; JOHN, V. M. Variability in the life cycle of concrete block CO₂ emissions and cumulative energy demand in the brazilian market. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 114, p. 588–594, 2016.

OZTURK, E. et al. Factors affecting the CO₂ emissions, cost efficiency and eco-strength efficiency of concrete containing rice husk ash: A database study. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 326, p. 126905, 2022.

PAKDEL, A.; AYATOLLAHI, H.; SATTARY, S. Embodied energy and CO₂ emissions of life cycle assessment (LCA) in the traditional and contemporary iranian construction systems. **Journal of Building Engineering**, Elsevier, v. 39, p. 102310, 2021.

PENG, Y.; YANG, L. E.; SCHEFFRAN, J. A life-cycle assessment framework for quantifying the carbon footprint of rural households based on survey data. **MethodsX**, v. 8, p. 101411, 2021.

PRADO, F.; MINUTOLO, M. C.; KRISTJANPOLLER, W. Forecasting based on an ensemble autoregressive moving average - adaptive neuro-fuzzy inference system – neural network - genetic algorithm framework. **Energy**, Elsevier, v. 197, p. 117159, 2020.

RASHID, K.; YAZDANBAKSH, A.; REHMAN, M. U. Sustainable selection of the concrete incorporating recycled tire aggregate to be used as medium to low strength material. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 224, p. 396–410, 2019.

REZENDE, S. O. **Sistemas Inteligentes: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2003.

SALAHADDIN, S. D.; HAIDO, J. H.; WARDEH, G. The behavior of UHPC containing recycled glass waste in place of cementitious materials: A comprehensive review. **Case Studies in Construction Materials**, Elsevier, v. 17, p. e01494, 2022.

SALEH, A. E. et al. A hybrid neuro-fuzzy power prediction system for wind energy generation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 74, p. 384–395, 2016.

SALMORAL, G.; YAN, X. Food-energy-water nexus: A life cycle analysis on virtual water and embodied energy in food consumption in the Tamar catchment, UK. **Resources, Conservation and Recycling**, Elsevier, v. 133, p. 320–330, 2018.

SARAVANAN, J.; SRIDHAR, M. Life cycle assessment of alternative building materials using idematlightlca mobile app. **Materials Today: Proceedings**, v. 65, p. 1243–1249, 2022.

SHAMSHIRBAND, S. et al. Heat load prediction in district heating systems with adaptive neuro-fuzzy method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 760–767, 2015.

SHARMA, N. K. W. e Harsukhpreet Singh e A. ANFIS: Adaptive neuro-fuzzy inference system - a survey. **Revista Internacional de Aplicações Informáticas**, v. 123, p. 32–38, 2015.

SILVA, G. A. d.; KULAY, L. A. Avaliação do ciclo de vida. In: JUNIOR, A. V.; DEMAJOROVIC, J. (Ed.). **Modelos e ferramentas de gestão ambiental: desafios e perspectivas para as organizações**. São Paulo: SENAC, 2006. p. 313–336.

SIMÕES, M. G.; SHAW, I. S. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Editora Blucher, 2007.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório anual: 2020**. São Paulo, 2020. 52 p.

SMITH, S. H.; DURHAM, S. A. A cradle to gate LCA framework for emissions and energy reduction in concrete pavement mixture design. **International Journal of Sustainable Built Environment**, Elsevier, v. 5, p. 23–33, 2016.

TAGHAVIFAR, H.; MARDANI, A. On the modeling of energy efficiency indices of agricultural tractor driving wheels applying adaptive neuro-fuzzy inference system. **Journal of Terramechanics**, Elsevier, v. 56, p. 37–47, 2014.

TAHSILDOOST, M.; ZOMORODIAN, Z. Energy, carbon, and cost analysis of rural housing retrofit in different climates. **Journal of Building Engineering**, v. 30, p. 101277, 2020.

TANG, Y. et al. Natural gravel-recycled aggregate concrete applied in rural highway pavement: Material properties and life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 334, p. 130219, 2022.

TRANG, Q. H. D. e T. V. Forecasting vietnamese stock index: A comparison of hierarchical ANFIS and LSTM. **Decision Science Letters**, v. 9, p. 193–206, 2020.

VELOSO, A. V. et al. Custo energético de construção de biodigestores para o manejo e tratamento de resíduos da suinocultura. **Energia na Agricultura**, EIA Energy in Agriculture, v. 33, n. 4, p. 330–337, 2019.

WANG, J. J. et al. Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 80, p. 1162–1174, 2017.

WOLF, C. D.; POMPONI, F.; MONCASTER, A. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 140, p. 68–80, 2017.

XING, W. et al. Effects of mix design and functional unit on life cycle assessment of recycled aggregate concrete: Evidence from CO₂ concrete. **Construction and Building Materials**, Elsevier, v. 348, p. 128712, 2022.

ZEINALNEZHAD, M. et al. Air pollution prediction using semi-experimental regression model and adaptive neuro-fuzzy inference system. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 261, p. 121218, 2020.

ZHANG, X.; ZHANG, X. Comparison and sensitivity analysis of embodied carbon emissions and costs associated with rural house construction in china to identify sustainable structural forms. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 293, p. 126190, 2021.

SEGUNDA PARTE - ARTIGOS

ARTIGO I - MODELO NEURO-FUZZY PARA PREDIÇÃO DO APORTE DE ENERGIA DE DIFERENTES DOSAGENS DE CONCRETO EM EDIFICAÇÕES

Este artigo está formatado de acordo com as normas da "Ambiente Construído". É uma versão final, aceita pelo conselho editorial do periódico.

Modelo neuro-fuzzy para predição do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações

Neuro-fuzzy model for energy prediction of different concrete dosages in buildings

Régis Marciano de Souza 
Ricardo Rodrigues Magalhães 
Alessandro Torres Campos 

Resumo

Com o aumento do processo de urbanização e da população das cidades, surge a necessidade de entender o custo energético para produção dos materiais de construção. Entre os instrumentos utilizados, o aporte de energia é um importante instrumento no monitoramento do uso de fontes de energia não renováveis para produção de concretos convencionais, o que demanda novas pesquisas na área. Neste trabalho, um modelo híbrido ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) foi desenvolvido para predição do aporte de energia, para a avaliação da demanda de energia necessária para cada um dos componentes na produção de concretos convencionais (cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo), mediante a utilização de 101 dosagens experimentais, 101 dosagens para validação e coeficientes energéticos disponíveis em literaturas. Identificou-se que a escolha adequada da dosagem pode gerar uma economia no custo energético para produção do concreto da ordem de 24,77%, mantendo a característica mecânica de resistência à compressão para construções convencionais.

Palavras-chave: Consumo de energia. Sistema ANFIS. Previsão do uso de energia na construção. Energia incorporada. Eficiência energética.

Abstract

An increasing process of urbanisation and a growing urban population heighten the need to understand the energy costs of the production of building materials. One of the most important tools applied to monitor the use of non-renewable energy resources in the production of conventional concretes is energy input, into which further research is needed. In this study, an ANFIS (adaptive neuro-fuzzy inference system) hybrid model was developed to predict energy input in order to evaluate the energy demand required for each component of the production of conventional concrete (cement, water, fine aggregate and coarse aggregate) using 101 experimental dosages, 101 validation dosages and energy coefficients available in literature. The results showed that an adequate dosage can generate energy cost savings of 24.77% in the production of concrete, while still maintaining the mechanical characteristics of compressive strength for conventional constructions.

Keywords: Energy consumption. ANFIS system. Building energy use prediction. Embodied energy. Energy efficiency.

¹Régis Marciano de Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência
e Tecnologia do Sul de Minas
Pouso Alegre - MG - Brasil

²Ricardo Rodrigues Magalhães
Universidade Federal de Lavras
Lavras - MG - Brasil

³Alessandro Torres Campos
Universidade Federal de Lavras
Lavras - MG - Brasil

Recebido em 04/12/19
Aceito em 23/05/20

Introdução

O desempenho energético das estruturas de concreto, sujeita a múltiplos carregamentos, têm sido objeto de estudo desde que se introduziu o concreto como um dos principais materiais da construção civil. Para De Souza, Magalhães e De Andrade (2019), no Brasil, como em muitos outros países, o concreto tem um papel importante na construção, sendo o principal e mais consumido material de construção no mundo. As construções em concreto desempenham uma importante função na sustentabilidade das cidades. Como o concreto é um material muito empregado em edificações, fica evidente que a demanda de energia no processo de produção desse material pode ser elevada.

Para Campos *et al.* (2003), o estudo do fluxo de energia é uma forma de mensurar a sustentabilidade e a eficiência de agroecossistemas, e possibilita a determinação detalhada da energia envolvida na obtenção de materiais, equipamentos e processos, apontando os elementos de maior aporte e propondo opções ambientalmente menos impactantes. A origem dos materiais ou matérias-primas empregados em uma construção é um dos principais fatores que influenciam seu custo energético.

O concreto é um material composto de agregado graúdo, agregado miúdo, cimento e água, podendo ainda conter adições minerais e aditivos químicos. É notório que o quantitativo dos componentes empregados na fabricação do concreto apresenta relevante contribuição para o projeto de edificações ambientalmente sustentáveis. Zhang e Wang (2016) identificaram a tendência geral de aumento da demanda de energia empregada na produção de construções civis e rurais, e afirmaram que a demanda de energia durante a etapa da construção corresponde a mais de 60% da energia empregada no ciclo de vida do setor da construção civil.

Para Gong *et al.* (2012), projetar estruturas sustentáveis para economizar recursos e reduzir o impacto ambiental durante o ciclo de vida (fabricação, planejamento, projeto, construção, operação, manutenção e descarte de materiais) é uma necessidade que demanda atenção especial, principalmente em regiões caracterizadas por rápida urbanização e industrialização. Analisando-se a demanda de energia em três edifícios construídos com diferentes materiais (concreto, aço e madeira), foram observadas características semelhantes de consumo de energia, com a demanda mais alta na fase de operação dos edifícios, seguida pela produção dos materiais incorporados. Comparando os três edifícios, o edifício em concreto obteve uma porcentagem de operação de 87%, o edifício em aço ficou com 76%, e o construído em madeira ficou com 71% do ciclo de vida, evidenciando a necessidade de um estudo para minimizar o impacto ambiental das construções em concreto armado.

Santos (2019), ao comparar dois tipos de sistemas de laje (maciça e *steel deck*) a partir de suas energias incorporadas na fase de pré-uso, concluiu que os sistemas diferiram em relação à energia incorporada na faixa dos 13%, mostrando que a energia incorporada da laje *steel deck* foi superior à maciça devido ao fato de o aço apresentar elevado grau de energia para sua extração e produção. De acordo com Mattioli *et al.* (2018), na construção de galpão para frangos de corte com modelo *Darkhouse*, o cimento apresentou a demanda de 8,47% do total de energia empregada na construção, sendo o segundo material de construção com maior aporte energético, perdendo lugar apenas para o aço.

Ainda, segundo Borges *et al.* (2014), existem tecnologias amplamente difundidas que buscam a redução do consumo de energia e de emissões durante o processo produtivo do cimento, uma delas, a utilização de equipamentos que demandam menos energia elétrica, tais como os moinhos verticais de cimento; outra, talvez a mais antiga, conhecida e difundida, o emprego de adições minerais na produção dos cimentos compostos. Na produção do concreto tradicional, o maior consumo de energia ocorre durante a produção de cimento Portland; cerca de 1.550 MJ de um total de 1.794 MJ são consumidos nesse processo, sendo grande parte dessa energia destinada à demanda térmica no processo de clínquerização.

A pesquisa nesse campo é muito pertinente no momento, diante do aumento da população e do processo de urbanização. De acordo com Deb *et al.* (2017), diferentes técnicas estão sendo aplicadas para predição do consumo de energia em construções. Com o intuito de compreender as formas de avaliar o consumo de energia em edifícios, Amasyali e El-Gohary (2018) apresentaram uma revisão dos estudos que desenvolveram modelos de previsão de consumo de energia de construção orientados a dados, com foco especial na revisão dos escopos de previsão, nas propriedades dos dados e nos métodos de pré-processamento de dados utilizados, nos *machine learning algorithms* utilizados para previsão e nas medidas de desempenho usadas para avaliação dos resultados.

Shaikh *et al.* (2014) apresentaram uma pesquisa abrangente e significativa realizada em sistemas de controle inteligentes de ponta para gerenciamento de energia e conforto em edifícios, visando fornecer melhor

compreensão e um conhecimento atualizado sobre tendências relacionadas a parâmetros de conforto, sistemas de controle, métodos computacionais inteligentes, ferramentas de simulação, comportamento e preferências dos ocupantes, tipos de construção, considerações sobre fontes de suprimento e interesse de pesquisa dos países nesse setor.

Naji *et al.* (2016) utilizaram o ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) para estimar o consumo de energia dos edifícios, com 180 simulações para diferentes valores de espessura do material e condutividade térmica do material de isolamento, por meio do software EnergyPlus. Os resultados obtidos foram mais confiáveis e precisos que os resultados por meio de ANN (*Artificial Neural Network*) e GP (*Genetic Programming*).

Mousavi-Avval *et al.* (2017) afirmaram que o ANFIS pode ser uma ferramenta útil para prever os índices energéticos, econômicos e ambientais dos sistemas de produção agrícola. Essa informação foi ratificada por Nabavi-Pelesaraei *et al.* (2018), que alegaram que o modelo de predição por ANFIS é o modelo mais indicado quando comparado com ANN, devido à maior velocidade computacional e a sua alta precisão, podendo ser utilizado para avaliar o fluxo de energia e os indicadores ambientais, e para o gerenciamento da tomada de decisões na produção de arroz. Outros trabalhos alcançaram bons resultados ao utilizar o ANFIS em problemas físicos de engenharia referentes à eficiência energética, entre eles os de Li, Su e Chu (2011), Al-Ghandoor (2013), Olatomiwa *et al.* (2015) e Shamshirband *et al.* (2015).

Além das características energéticas dos componentes de um concreto, é importante correlacionar o desempenho sustentável com a eficiência em relação às características físicas dos concretos fresco e endurecido, características essas essenciais em estruturas de concreto armado. Diferentes fatores diretos e indiretos podem influenciar no fluxo de energia, nas características físicas, químicas e mecânicas de concretos de diferentes dosagens. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a resistência mecânica à compressão e a trabalhabilidade do concreto no estado fresco podem ter suas características físicas, químicas e mecânicas alteradas em função das características dos componentes (agregado miúdo, agregado graúdo, água e cimento) e do quantitativo desses componentes na produção de concretos convencionais.

Como o concreto é um material com uma energia incorporada relativamente alta, é adequado um estudo da interação entre o quantitativo dos componentes empregados e sua relação com a eficiência energética de edificações. Este trabalho propõe o uso do sistema ANFIS como forma alternativa para predição de dosagens de concreto com menor impacto na demanda de energia para a construção de edificações, sem perder as características mecânicas de resistência à compressão do material e mantendo a trabalhabilidade compatível com o comportamento físico de um concreto convencional no estado fresco, por ser uma técnica que tem alcançado bons resultados em predições de cenários referentes à demanda de energia em edificações. Objetiva-se ainda interpretar o fluxo de energia no processo para diferentes dosagens e avaliar o impacto no custo energético para implantação de uma edificação em concreto armado para diferentes dosagens de concreto, no intuito de identificar correlações entre as variáveis e interpretar o fluxo energético no campo das dosagens de concretos eficientes em relação à demanda de energia. Busca-se evidenciar novas contribuições científicas para estudo da demanda de energia no processo de fabricação do material mais utilizado na construção civil (concreto), o que vem ao encontro de pesquisas recentes sobre a avaliação do impacto ambiental em edificações, entre as quais se destacam as pesquisas de Gong *et al.* (2012), Deb *et al.* (2017), Nabavi-Pelesaraei *et al.* (2018), Mattioli *et al.* (2018) e Santos (2019).

Materiais e métodos

Foi adotada a seguinte organização neste estudo:

- (a) um banco de dados foi desenvolvido, composto de 101 dados experimentais de corpos de prova, para diferentes dosagens de concreto;
- (b) utilizando coeficientes energéticos de literaturas, foi determinada a energia empregada em cada uma das dosagens propostas;
- (c) um modelo híbrido neuro-fuzzy (ANFIS) foi desenvolvido para prever a demanda de energia dos diferentes cenários, atendendo ao domínio proposto para o quantitativo de cada um dos componentes das dosagens; e
- (d) uma edificação-tipo foi proposta para um estudo comparativo do impacto na demanda de energia de dosagens com máxima e mínima demanda de energia, considerando intervalos predefinidos de resistência mecânica à compressão.

Características do concreto

Com o intento de gerar um banco de dados de dosagens de concreto convencionais, para avaliação da resistência à compressão e da demanda de energia embutida, os agregados miúdos e graúdos foram caracterizados de acordo com as normas NBR NM 27 (ABNT, 2001), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 52 (ABNT, 2009a) e NBR NM 53 (ABNT, 2009b), conforme a Tabela 1.

A pesquisa foi realizada no município de Pouso Alegre, MG (Brasil), e foi adotada a água proveniente da rede de abastecimento público, com agregado miúdo natural e agregado graúdo formado por britagem de rochas da região, procedimento esse de acordo com Santos e Ferrari (2019), materiais representados na Figura 1(a).

Para uma efetiva avaliação quantitativa de cada componente na moldagem dos corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, utilizou-se um único cimento Portland do tipo CP II E, classificado e padronizado pela norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018). Todos os corpos de provas foram preparados em condições ambientais semelhantes, moldados e com adensamento manual com 2 camadas e 12 golpes por camada, utilizando-se o processo de cura por imersão em água, Figura 1(c) e 1(d), procedimentos esses estabelecidos na norma NBR 5738 (ABNT, 2015a). Durante o preparo dos corpos de prova, foi realizado também o ensaio de abatimento de tronco de cone do concreto para a avaliação da trabalhabilidade das amostras, de acordo com o estabelecido na norma NBR NM 67 (ABNT, 1998), Figura 1(b).

A resistência mecânica à compressão dos corpos de prova capeados com Neoprene foi determinada, após 28 dias de cura por imersão em água, por ensaio de compressão axial utilizando máquina universal eletrônica digital com capacidade 100 t (hidráulica I-3058, da marca Pavitest), procedimentos de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2015d), Figuras 1(e) e 1(f). Esses procedimentos foram aplicados para as 101 dosagens propostas (Tabela 4), adotou-se uma amostragem com boa distribuição, e cada dosagem teve uma amostragem com representatividade quantitativa estabelecida conforme proposto pela norma NBR 12655 (ABNT, 2015c).

A definição das dosagens utilizadas nesta pesquisa teve como ponto de partida 50 dosagens preliminares desenvolvidas com uso do método ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). Foram adotados intervalos para as variáveis de entrada (cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água) similares aos adotados por Abolpour *et al.* (2013), Tabela 3. Com o uso dessas dosagens preliminares e dos valores máximos e mínimos das variáveis de entrada e saída (Tabela 3), foram propostas 101 dosagens bem distribuídas entre os intervalos previstos, com o apoio do software Microsoft Excel.

Análise energética da edificação

A indústria do cimento demanda muita energia na produção do cimento Portland, sendo o cimento uma matéria-prima para a produção dos concretos em construções convencionais. Com o avanço da urbanização e com o aumento da população, diferentes trabalhos foram propostos nos últimos anos com o intuito de propor alternativas para minimizar o impacto ambiental gerado por esse aumento da demanda de energia necessária na construção, nos materiais e no ciclo de vida das edificações. Neste trabalho, para a avaliação da demanda de energia das diferentes dosagens propostas, utilizaram-se coeficientes energéticos de literatura, conforme a Tabela 2, procedimento também adotado por Santos (2019).

Para a montagem do banco de dados de demanda de energia por dosagens, cada componente constituinte das dosagens propostas foi selecionado de forma a manter a trabalhabilidade e a resistência mecânica à compressão dentro de limites (mínimos e máximos) compatíveis com valores adotados em concretos convencionais. O domínio desses componentes no campo quantitativo das dosagens foi similar aos valores adotados por Abolpour *et al.* (2013), conforme a Tabela 3.

Tabela 1 - Propriedades físicas dos agregados graúdos e miúdos

	Agregado miúdo	Agregado graúdo
Massa específica unitária média em kg/m	1.600,67	1.526,90
Massa específica aparente média em kg/m	2.107,05	2.673,47

Figura 1 - Materiais empregados na produção do concreto e ensaios utilizados na avaliação dos corpos de prova

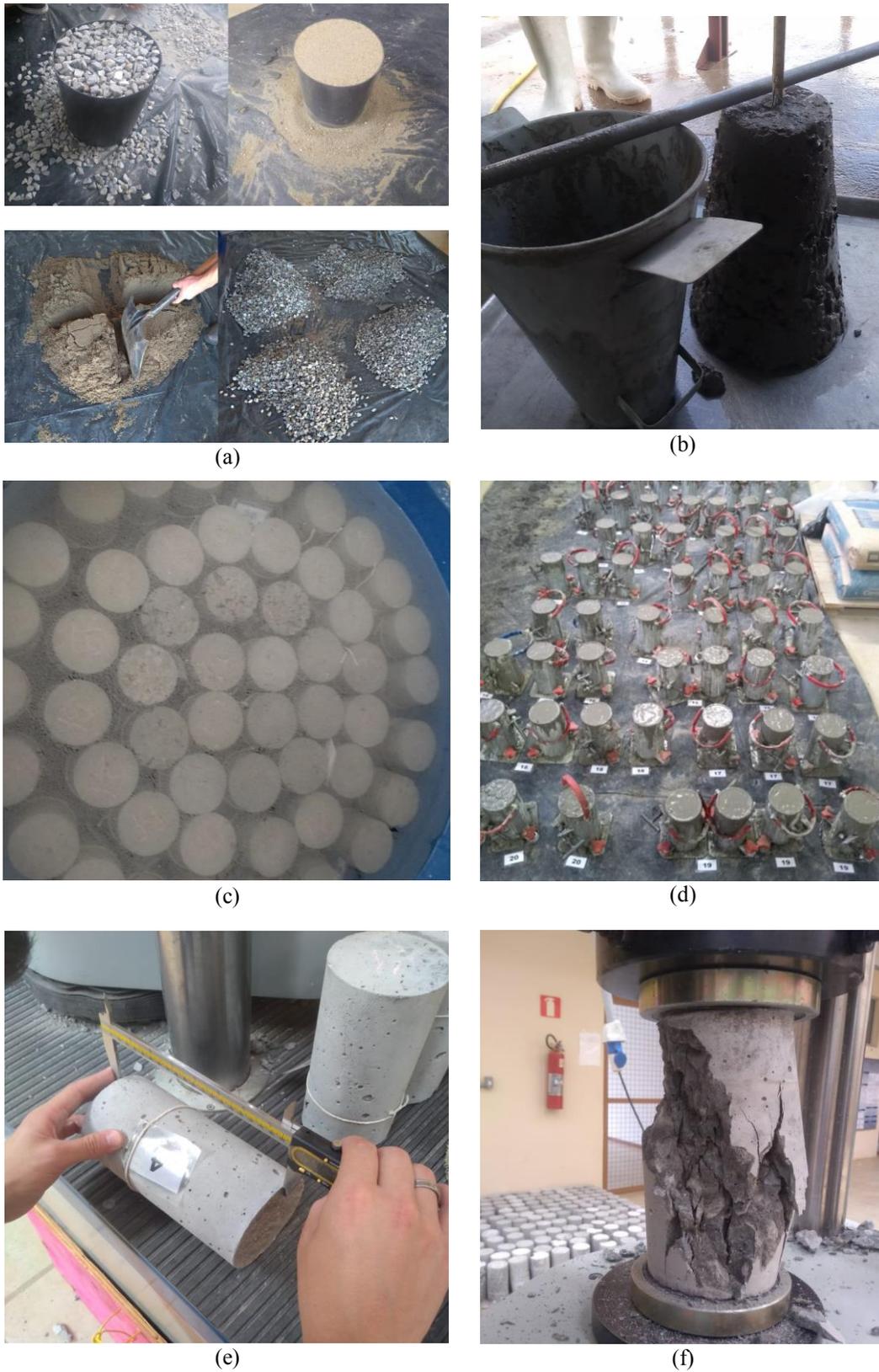


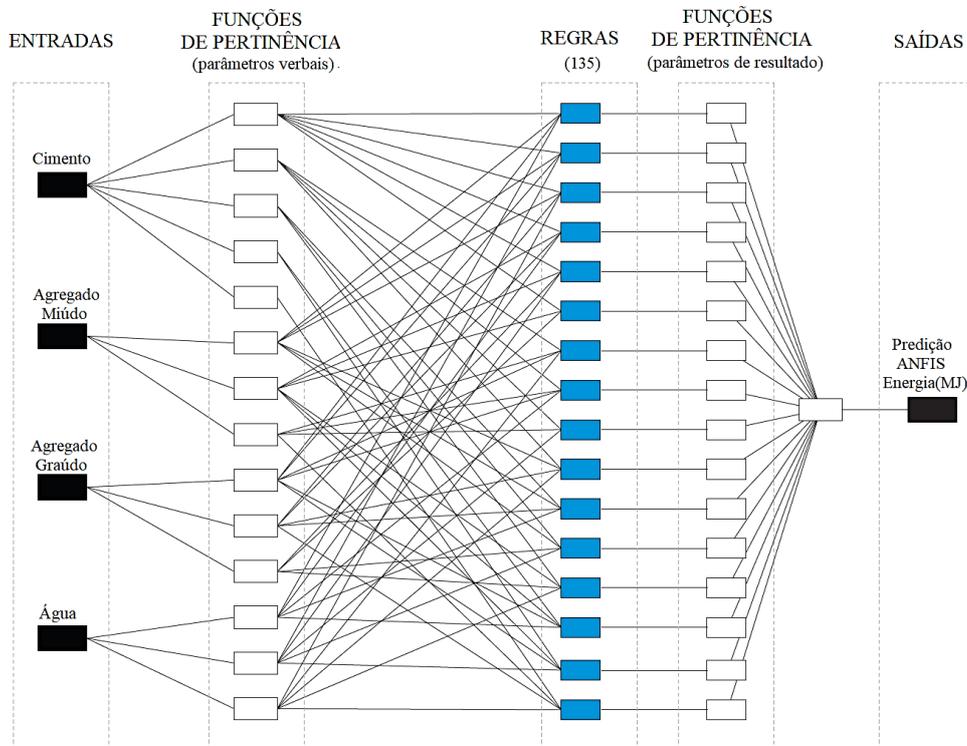
Tabela 2 - Coeficientes energéticos dos componentes do concreto

Componente analisado	Coefficiente energético	Fonte
Cimento Portland	4,80 MJ/kg	Mithun e Narasimhan (2015)
Agregado graúdo	0,083 MJ/kg	Mithun e Narasimhan (2015)
Agregado miúdo	0,081 MJ/kg	Mithun e Narasimhan (2015)
Água	0,200 MJ/kg	Mithun e Narasimhan (2015)

Tabela 3 - Domínio dos componentes das dosagens

Cimento Portland (kg/m ³)		Água (kg/m ³)		Agregado graúdo (kg/m ³)		Agregado miúdo (kg/m ³)	
Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
[380	- 595]	[155	- 270]	[800	- 1.150]	[180	- 735]

Figura 2 - Arquitetura do modelo ANFIS



O modelo proposto por Abolpour *et al.* (2013) utilizou lógica *fuzzy* para a avaliação da resistência mecânica à compressão de concretos não convencionais, considerando como variáveis de entrada quantitativo de cimento, água, escória granulada de alto forno, cinza volante, superplastificante, agregado miúdo, agregados graúdos e idade do concreto. Neste trabalho, para o preparo das dosagens, foram considerados os componentes cimento, água, agregado graúdo e agregado miúdo, levando-se em consideração que um concreto com esses componentes foi definido como convencional por Knoeri, Sanyé-Mengual e Althaus (2013). O banco de dados adotado nesta pesquisa para a avaliação da demanda de energia total por dosagem, considerando os coeficientes energéticos da Tabela 2, está apresentado na Tabela 4.

Modelo neuro-fuzzy

Neste trabalho um modelo híbrido ANFIS foi utilizado para prever o consumo de energia na produção de concretos convencionais. Essa abordagem híbrida é mais indicada para a análise da eficiência energética (NAJI, 2016; NABAVI-PELESARAEI *et al.*, 2018).

O sistema híbrido proposto utiliza de RNA (*Artificial Neural Networks*) combinado com lógica *fuzzy* baseada no processo de inferência *fuzzy* de Takagi-Sugeno para definição das características do modelo ANFIS (Figura 2). O modelo foi treinado baseado no banco de dados mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Banco de dados das dosagens

Cimento (kJ/m ³)	Demanda de energia			Energia total (MJ)	fc (MPa)	Slump (mm)	Demanda de energia				Energia total (MJ)	fc (MPa)	Slump (mm)
	Areia (kJ/m ³)	Brita (kJ/m ³)	Água (kJ/m ³)				Cimento (kJ/m ³)	Areia (kJ/m ³)	Brita (kJ/m ³)	Água (kJ/m ³)			
2.066,11	19,58	77,86	43,00	2.206,55	12,4	200	1.935,79	45,82	93,87	44,91	2.120,39	15,6	190
2.869,63	34,03	71,65	47,09	3.022,40	36,3	145	1.896,24	48,62	85,62	44,89	2.075,37	17,1	185
2.769,65	47,79	90,47	49,31	2.957,22	31,5	140	1.947,94	32,31	77,65	44,09	2.101,98	12,3	220
2.668,37	55,18	70,38	50,35	2.844,28	30,3	145	2.010,53	22,48	85,96	44,03	2.162,99	12,1	220
2.741,71	58,55	81,10	52,15	2.933,51	29,5	150	1.876,80	30,55	73,01	42,54	2.022,90	12,3	215
2.799,74	56,60	79,09	52,72	2.988,15	29,4	160	1.933,39	41,52	92,81	45,53	2.113,24	14,6	190
2.674,90	38,39	72,70	47,05	2.833,04	25,4	150	1.931,57	53,78	84,31	47,30	2.116,95	16,0	205
2.762,26	40,16	73,17	48,98	2.924,56	36,6	135	1.846,18	26,13	84,94	42,12	1.999,37	12,0	215
2.646,24	18,44	68,55	42,57	2.775,80	38,0	75	1.910,93	52,69	76,44	48,02	2.088,08	16,9	220
2.676,00	28,44	78,58	45,92	2.828,94	32,3	105	2.484,29	21,61	80,44	32,69	2.619,02	46,8	10
2.627,28	26,58	94,60	45,15	2.793,61	27,4	25	2.150,50	35,94	82,45	34,71	2.303,58	39,2	30
2.705,90	55,63	69,44	53,28	2.884,26	31,6	175	2.353,54	35,28	68,51	33,52	2.490,85	49,9	15
2.579,62	44,20	71,32	48,86	2.744,00	21,5	220	2.161,15	25,87	86,25	32,23	2.305,50	35,6	10
2.573,90	57,30	92,31	52,03	2.775,55	25,2	135	1.947,17	59,47	80,17	36,54	2.123,34	38,6	15
2.552,64	45,26	82,57	49,41	2.729,88	25,1	150	2.497,68	40,38	81,39	34,60	2.654,05	51,8	5
2.634,05	17,05	90,89	44,59	2.786,58	21,1	130	2.639,71	52,60	94,29	36,16	2.822,76	53,9	0
2.546,16	49,62	86,15	50,57	2.732,51	23,4	175	2.606,54	42,44	82,64	35,42	2.767,04	49,3	0
2.580,82	52,09	85,89	52,38	2.771,17	29,8	150	2.187,55	37,57	81,26	34,50	2.340,88	47,2	0
2.517,98	36,39	81,11	48,22	2.683,71	17,9	170	2.052,96	58,52	66,52	37,72	2.215,72	42,7	15
2.523,94	40,46	80,18	49,38	2.693,96	23,1	130	1.964,98	53,69	81,92	37,48	2.138,07	34,7	35
2.302,80	39,05	84,77	46,66	2.473,29	20,1	150	2.392,85	51,56	68,91	37,03	2.550,35	37,9	65
2.425,78	43,67	90,58	49,98	2.610,01	19,6	200	1.993,49	46,57	73,65	36,28	2.149,99	37,9	110
2.411,52	38,16	89,51	48,56	2.587,74	16,4	185	2.194,75	45,03	72,58	34,60	2.346,96	50,2	10
2.376,34	45,87	82,29	49,87	2.554,37	23,5	190	2.773,30	25,25	71,20	33,49	2.903,23	56,4	0
2.436,05	51,02	88,30	52,02	2.627,39	19,6	200	2.622,24	23,03	77,14	31,78	2.754,18	54,2	0
2.361,84	32,01	76,95	46,69	2.517,50	19,1	190	2.799,70	50,74	67,47	37,14	2.955,04	54,3	0
2.420,93	59,22	95,17	53,75	2.629,07	22,6	155	2.065,49	35,90	72,94	35,63	2.209,96	41,6	55
2.290,61	26,11	94,65	44,25	2.455,62	20,6	175	2.472,67	33,35	80,68	37,17	2.623,87	57,1	25
2.267,57	16,05	94,86	42,14	2.420,62	11,4	175	2.799,22	16,36	94,41	31,97	2.941,96	49,6	0
2.399,09	37,53	66,41	52,02	2.555,05	18,9	220	2.747,38	53,61	84,98	39,41	2.925,38	51,5	0
2.342,64	17,16	84,94	43,77	2.488,51	15,7	190	2.077,92	45,22	87,68	35,87	2.246,69	36,5	20
2.395,01	36,41	75,83	48,99	2.556,25	17,6	200	2.160,00	32,40	91,30	48,00	2.331,70	11,2	195
2.331,31	50,34	94,13	51,82	2.527,60	18,0	150	2.496,00	19,44	70,55	45,00	2.630,99	16,8	165
2.313,79	30,02	75,02	47,13	2.465,97	17,5	200	2.280,00	36,45	68,06	36,00	2.420,51	42,6	35
2.227,68	28,34	74,06	45,59	2.375,67	14,1	190	2.064,00	48,60	83,00	38,00	2.233,60	31,9	10
2.241,79	54,03	92,24	51,57	2.439,62	18,2	165	1.968,00	28,35	69,31	50,00	2.115,66	8,9	240
2.286,05	39,47	78,38	49,49	2.453,39	17,5	215	2.688,00	51,03	87,15	40,00	2.866,18	46,0	20
2.272,99	20,13	87,68	45,18	2.425,99	13,6	180	2.376,00	20,25	70,55	52,00	2.518,80	11,2	225
2.155,39	48,87	78,55	49,62	2.332,43	17,0	205	1.968,00	17,01	88,81	32,00	2.105,82	31,3	0
2.190,24	23,60	75,21	44,78	2.333,83	13,7	215	2.400,00	56,70	72,63	40,00	2.569,33	41,6	0
2.116,08	51,17	90,74	49,67	2.307,66	15,3	165	2.160,00	40,50	93,38	35,00	2.328,88	36,1	0
2.140,22	51,28	77,14	50,28	2.318,92	14,3	220	2.784,00	22,68	76,36	48,00	2.931,04	21,5	155
2.217,36	19,27	92,13	45,07	2.373,84	13,4	190	2.640,00	36,45	83,83	54,00	2.814,28	16,4	215
2.140,03	48,19	81,16	50,39	2.319,78	15,2	205	2.496,00	25,11	74,70	46,00	2.641,81	20,2	200
2.072,93	37,19	70,75	47,34	2.228,21	12,2	220	1.992,00	51,84	90,06	33,00	2.166,90	28,0	0
2.079,02	40,40	72,62	48,26	2.240,29	12,2	230	2.352,00	26,73	67,23	44,00	2.489,96	10,7	170
2.097,26	27,37	80,83	45,77	2.251,23	12,3	225	2.448,00	17,01	68,48	53,00	2.586,49	17,0	245
2.029,01	27,32	88,75	44,49	2.189,58	12,2	210	2.784,00	52,65	76,36	34,00	2.947,01	48,4	0
2.091,55	52,73	86,04	47,28	2.277,60	19,7	175	2.856,00	38,88	85,91	49,00	3.029,79	29,6	155
1.984,51	21,72	94,29	41,20	2.141,72	12,7	180	1.992,00	37,26	68,06	46,00	2.143,32	10,9	240
2.083,44	29,71	76,58	45,06	2.234,79	13,3	225							

No entanto, para melhorar a confiabilidade e minimizar os desvios dos dados de predição, diferentes possibilidades de modelos ANFIS foram testadas. Toda a modelagem foi realizada utilizando o software comercial MATLAB, com auxílio computacional do Fuzzy Logic Toolbox, da função ANFIS da linha de comando e do aplicativo iterativo Neuro-Fuzzy Designer.

O modelo híbrido ANFIS proposto foi preparado com 135 parâmetros lineares, 28 parâmetros não lineares e 135 regras. Na etapa de transformação os valores discretos das variáveis de entrada foram convertidos em valores difusos (*fuzzification*), sendo adotados cinco conjuntos *fuzzy* de entrada com funções de pertinência do tipo gaussiana. Para a representação da variável de entrada cimento (kJ/m³) foram adotadas cinco funções de pertinência. Para a representação da variável de entrada água (kJ/m³) foram adotadas três funções de pertinência.

Além disso, foram adotadas três funções de pertinência para os conjuntos *fuzzy* de entrada agregado miúdo (kJ/m³) e agregado graúdo (kJ/m³). Por fim, foi adotada a média ponderada de todas as saídas de regra, por ser o padrão para os sistemas de inferência de Takagi-Sugeno. Os procedimentos metodológicos utilizados para modelar o ANFIS proposto foram compatíveis com os métodos adotados por Li, Su e Chu (2011) e Shamshirband *et al.* (2015).

Buscando maior confiabilidade do modelo híbrido ANFIS, o modelo de predição foi submetido a testes de validação por meio de predições da energia para diferentes dosagens. Foram utilizadas 101 combinações de dosagens, de acordo com os limites da Tabela 3, adotando concreto com características semelhantes à proposta desta pesquisa e coeficientes energéticos da Tabela 2. Entre as dosagens utilizadas, vale destacar as que foram propostas por Hatem *et al.* (2012), Gupta (2015) e Ahmed *et al.* (2016).

Característica da edificação

Objetivando uma discussão da demanda de energia para diferentes dosagens aplicadas em uma construção-tipo, foram propostas algumas etapas:

- (a) modelagem de uma construção-tipo no software Revit para determinação do volume de concreto necessário na construção (Figura 3);
- (b) determinação de dosagens baseada no banco de dados (Tabela 4) em função da demanda de energia máxima e mínima para diferentes intervalos de resistência mecânica à compressão;
- (c) avaliação do impacto na demanda de energia comparando as dosagens com máxima e mínima demanda de energia dentro de intervalos de resistência mecânica à compressão; e
- (d) discussão e avaliação da demanda de energia necessária na construção proposta.

A construção proposta tem área interna total de 55,11 m², em concreto armado, vedação com uso de blocos não estruturais e pé-direito de 3,0 m. Para a avaliação do volume estimado de concreto necessário, foram considerados os elementos vigas, pilares, fundação do tipo radier, lajes maciças e dez por cento de perdas diversas, que podem ocorrer na etapa da construção. Portanto, para a construção da edificação proposta, considerou-se um volume aproximado de 25 m³ de concreto convencional.

Os dados de demanda de energia por dosagem foram correlacionados com a resistência mecânica à compressão (f_c), na Figura 4. Para comparação das dosagens e das diferentes demandas de energia, foram avaliados limites máximos e mínimos de demanda de energia por intervalos definidos com valores de 10 MPa em 10 MPa da f_c .

Diante de diferentes possibilidades de combinações de componentes, foi proposto o uso de valores máximos e mínimos de energia por dosagem para cada intervalo, com valor de 10 MPa, conforme a Tabela 5. Essas dosagens foram adotadas na construção proposta no intuito de identificar a demanda de energia total para a construção proposta e qual o impacto ambiental na demanda de energia para diferentes dosagens.

Resultados e discussões

Neste item, parâmetros estatísticos e um banco de dados composto de 101 dados foram empregados na validação do modelo ANFIS. Diferentes dosagens foram analisadas para o estudo da demanda total de energia da edificação proposta, e os resultados foram discutidos com base em diferentes literaturas.

Figura 3 - Planta baixa humanizada

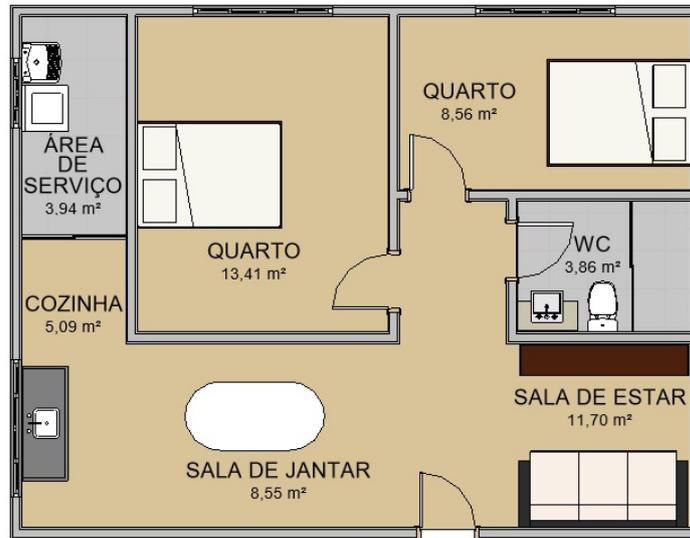


Figura 4 - Demanda de energia em função da resistência mecânica

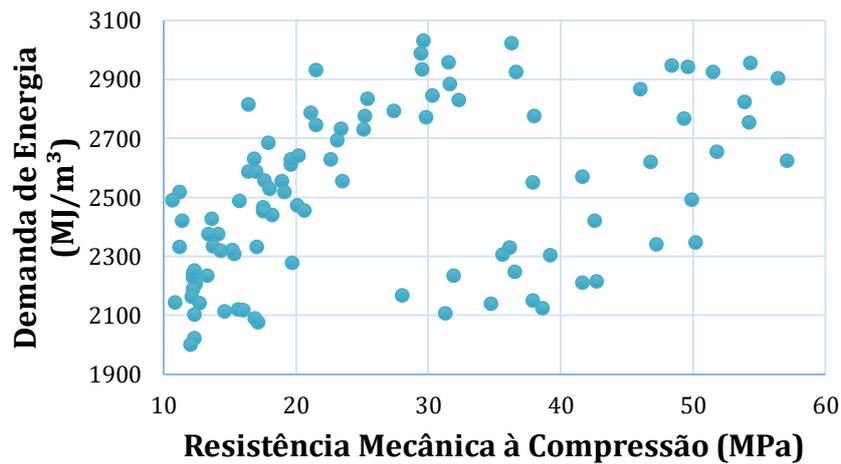


Tabela 5 - Dosagens em função da demanda máxima e mínima de energia

Dosagens de concreto	Demanda de energia	Energia total (MJ/m ³)	Domínio da variável fc (MPa)	fc (MPa)	Slump (mm)	Cimento Portland (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)
A	Máximo	2.814,28	10 - 20	16,4	215	550,00	270,00	1.010,00	450,00
B	Mínimo	1.999,37	10 - 20	12,0	215	384,62	210,61	1.023,39	322,61
C	Máximo	3.029,79	20 - 30	29,6	155	595,00	245,00	1.035,00	480,00
D	Mínimo	2.166,90	20 - 30	28,0	0	415,00	165,00	1.085,00	640,00
E	Máximo	3.022,40	30 - 40	36,3	145	597,84	235,46	863,20	420,07
F	Mínimo	2.105,82	30 - 40	31,3	0	410,00	160,00	1.070,00	210,00
G	Máximo	2.941,96	40 - 50	49,6	0	583,17	159,87	1.137,47	202,00
H	Mínimo	2.209,96	40 - 50	41,6	55	430,31	178,16	878,76	443,26
I	Máximo	2.955,04	50 - 60	54,3	0	583,27	185,70	812,87	626,4
J	Mínimo	2.623,87	50 - 60	57,1	25	515,14	185,84	972,09	411,72

Avaliação do modelo de predição ANFIS

O modelo preditivo do consumo de energia para diferentes dosagens de concreto convencional foi avaliado por meio do coeficiente de variação (CV), do erro percentual absoluto médio (MAPE) e da raiz quadrada do erro médio (RMSE). Para Amasyali e El-Gohary (2018), essas três medidas são as mais utilizadas na avaliação de modelos de previsão de consumo de energia. Esses parâmetros estatísticos são apresentados respectivamente nas Equações 1, 2 e 3. O modelo também foi avaliado por meio do coeficiente de determinação (R^2), conforme a Equação 4.

$$CV(\%) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{predict,i} - y_{data,i})^2}{n}}}{\bar{y}_{data}} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$MAPE(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{predict,i} - y_{data,i}}{y_{data,i}} \right| \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

$$RMSE(MJ) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{predict,i} - y_{data,i})^2}{n}} \quad \text{Eq. 3}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{predict,i} - y_{data,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{data,i} - \bar{y}_{data})^2} \quad \text{Eq. 4}$$

Em que:

$y_{predict,i}$ é o valor previsto do consumo de energia no instante i ;

$y_{data,i}$ é o valor conhecido do consumo de energia no instante i ; e

\bar{y}_{data} é a média dos valores conhecidos de consumo de energia do banco de dados, para n dados.

O modelo híbrido ANFIS obtido neste trabalho alcançou resultados significativos, avaliado por meio de CV de 0,0041291%, MAPE de 0,0025834%, RMSE de 0,1033037MJ e R^2 de 0,9999999, conforme representado na Tabela 6.

Resultados ANFIS

O modelo híbrido ANFIS proposto apresentou comportamento adequado e compatível com os dados de treinamento e de validação. Para a representação gráfica foram obtidos diferentes modelos de superfícies *fuzzy*, e verificaram-se pontos de mínima e máxima energia para diferentes dosagens, em função dos componentes do concreto (Figura 5).

Para a comprovação da eficiência do modelo, este foi avaliado por meio dos parâmetros estatísticos das Equações 1, 2, 3 e 4, respectivamente coeficiente de variação (CV), erro percentual absoluto médio (MAPE), raiz quadrada do erro médio (RMSE) e coeficiente de determinação (R^2). Nesse processo de validação obteve-se um resultado preciso e acurado, caracterizado por CV de 1,6969%, MAPE de 0,5792%, RMSE de 41,8834MJ e R^2 de 0,9771, conforme a Tabela 7.

Os resultados dos parâmetros estatísticos adotados (CV, MAPE, RMSE e R^2) apresentaram valores similares aos obtidos por Amasyali e El-Gohary (2018). A convergência das predições pode ser visualizada por meio do parâmetro R^2 na Figura 6. Os maiores valores de divergência relativa foram encontrados ao simular os dados de Hatem *et al.* (2012), Gupta (2015) e Ahmed *et al.* (2016). Essa divergência pode ser devida às diferentes características dos concretos adotados nas distintas pesquisas. Neste caso, observou-se divergência máxima de 12,22% da predição ANFIS em relação à demanda de energia conhecida do banco de dados.

Consumo de energia

O requerimento energético total incorporado no concreto, para diferentes dosagens, apresentou resultados com variações absolutas para um mesmo intervalo de resistência mecânica à compressão, de 8.279,25 MJ a 22.914,50 MJ. Os valores correspondem a um valor médio de 24,77% da demanda total de energia necessária na construção. Os valores de demanda de energia para a construção proposta utilizando as dosagens da Tabela 5 estão representados na Tabela 8.

Tabela 6 - Desempenho estatístico do modelo ANFIS

	CV (%)	MAPE (%)	RMSE (MJ)	R ²
ANFIS	0,0041	0,0026	0,1033	0,9999

Figura 5 - Modelo híbrido de predição ANFIS do consumo de energia para diferentes combinações

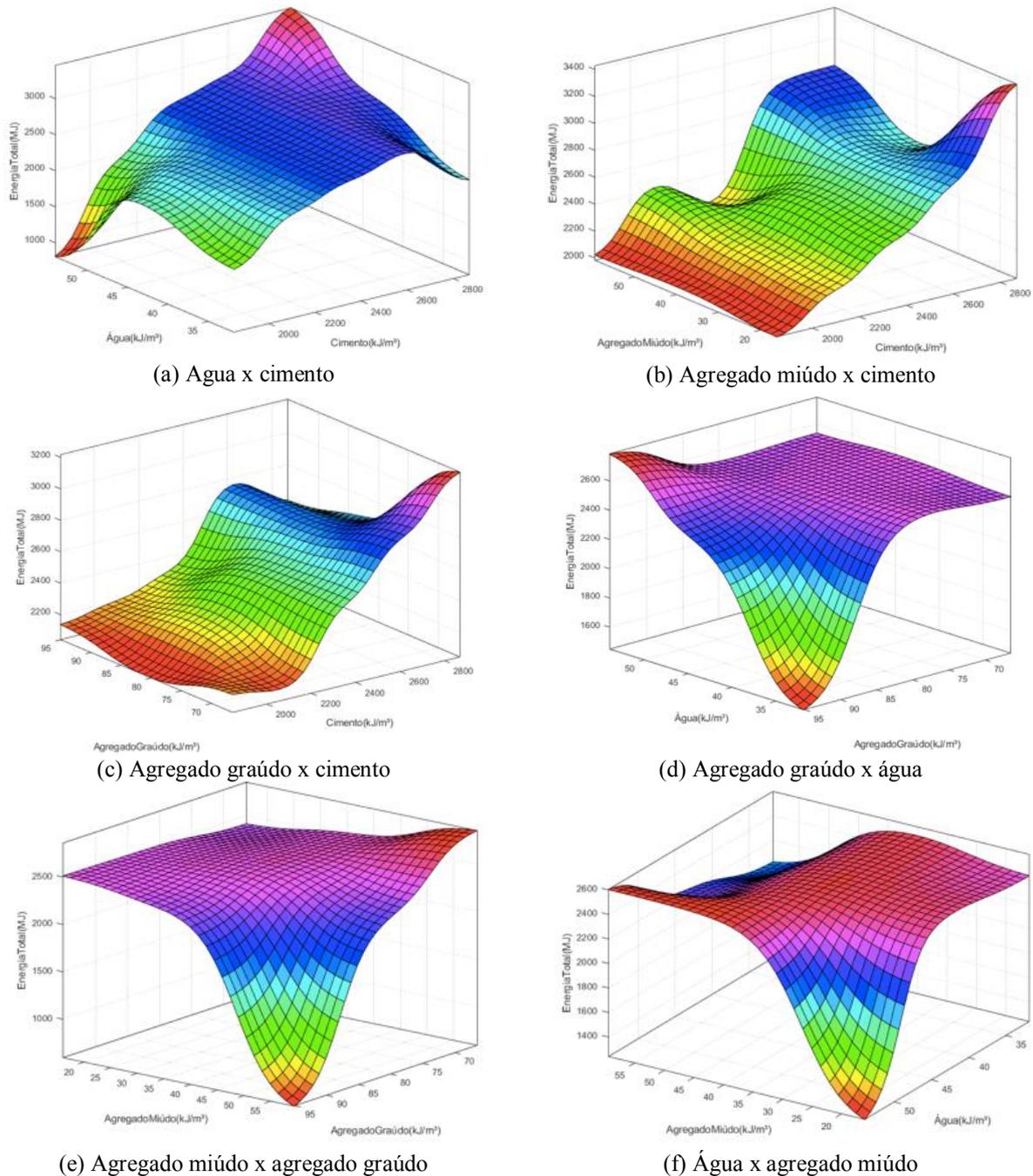


Tabela 7 - Validação estatística do modelo ANFIS

	CV (%)	MAPE (%)	RMSE (MJ)	R ²
ANFIS	1,6969	0,5792	41,8834	0,9771

Figura 6 - Dispersão de dados reais e previstos pelo ANFIS

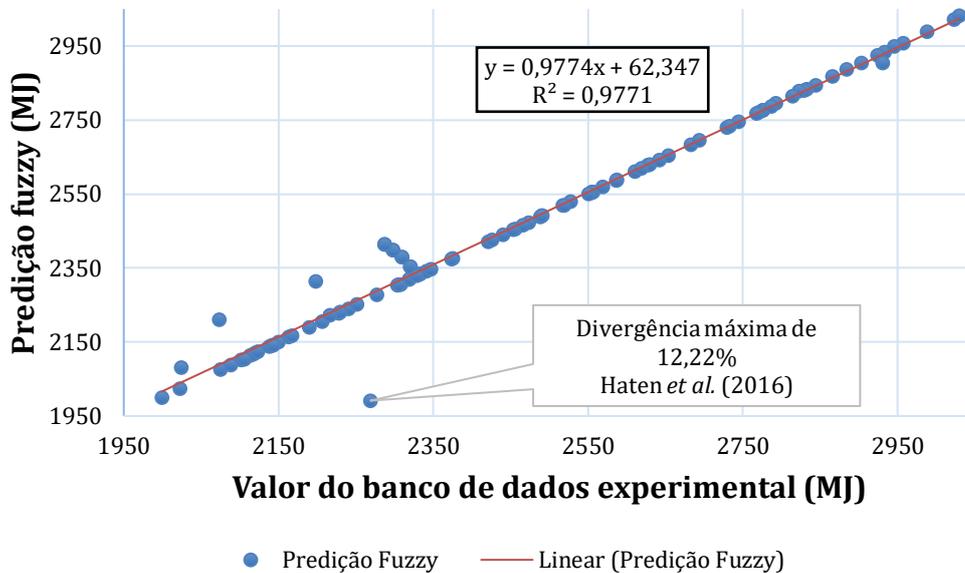


Tabela 8 - Demanda total de energia para a construção proposta

Dosagens de concreto	Demanda de energia	Domínio da variável f_c (MPa)	Demanda total de energia (MJ) para diferentes dosagens
A	Máximo	10 - 20	70.357
B	Mínimo	10 - 20	49.984
C	Máximo	20 - 30	75.745
D	Mínimo	20 - 30	54.173
E	Máximo	30 - 40	75.560
F	Mínimo	30 - 40	52.646
G	Máximo	40 - 50	73.549
H	Mínimo	40 - 50	55.249
I	Máximo	50 - 60	73.876
J	Mínimo	50 - 60	65.597

O modelo desenvolvido foi capaz de prever valores da demanda de energia para o intervalo de 10,7 MPa a 57,1 MPa de resistência mecânica à compressão de concretos (estruturais e não estruturais). Observou-se que dosagens com resistência mecânica à compressão entre 10 MPa e 20 MPa podem apresentar uma demanda considerável de energia, o que pode influenciar na escolha de qual dosagem adotar. Esse tipo de concreto não pode ser utilizado para fins estruturais, tendo seu campo de atuação limitado a aplicações sem fins estruturais, conforme importante ressalva da norma NBR 8953 (ABNT, 2015b).

Observou-se que a escolha adequada da dosagem pode influenciar significativamente na sustentabilidade do sistema de produção de concretos. Essa alteração na dosagem também pode gerar economia no custo total da produção de edificações em concreto armado. Observou-se ainda que a demanda de energia na produção do cimento mostrou ser um fator significativo para a demanda total de energia da dosagem, fato esse ratificado por Wang *et al.* (2017), que pode ser verificado na Figuras 5(a), 5(b) e 5(c).

A escolha da dosagem do concreto pode ainda considerar outros aspectos técnicos, sociais e econômicos, transformando esses diferentes aspectos em indicadores para facilitar comparações entre diferentes alternativas e apoiar a tomada de decisão rápida, conforme relatado por Wang *et al.* (2017). Fica evidenciada a necessidade da consideração de aspectos técnicos e sociais, além da demanda de energia no projeto de estruturas em concreto armado, sendo a modelagem híbrida (neuro-fuzzy) uma ferramenta que pode ser utilizada na tomada de decisões em projetos com o intuito de avaliar o aporte de energia mínima para a sustentabilidade e o bom desempenho do sistema. Abolpour *et al.* (2013) ratificaram os resultados obtidos nesta pesquisa ao afirmarem que, devido à complexidade do processo de dosagens em concreto, o uso de modelos baseados em lógica *fuzzy* pode superar modelagens matemáticas tradicionais (derivação de um

modelo matemático para descrever o sistema), por conseguir trabalhar em cenários difusos e lidar com a relação entre as variáveis de entrada e saída, considerando os parâmetros importantes no processo.

Conclusões

Esta pesquisa verificou uma alternativa para a avaliação do aporte de energia em diferentes concretos, buscando a eficiência no quesito sustentabilidade do processo de produção do concreto para construções, por meio da avaliação do quantitativo de cada um dos componentes necessários para a produção de concretos convencionais (cimento, água, agregado miúdo e agregado graúdo), utilizando 101 dosagens experimentais distintas.

A proposta deste estudo foi alcançada mediante o desenvolvimento de um modelo híbrido ANFIS, que foi avaliado por meio de parâmetros estatísticos (CV, MAPE, RMSE e R). O modelo adaptativo neuro-fuzzy apresentou bom desempenho ao predizer dados de energia para diferentes dosagens, caracterizando-se como ferramenta útil para a tomada de decisão em projetos de engenharia.

Conclui-se com este estudo que podem ocorrer variações significativas na demanda de energia total para diferentes dosagens e que essa informação pode ser utilizada para predição de dosagens com menor aporte de energia, com resistência mecânica à compressão de características semelhantes às de maior aporte. Verificou-se ainda que essa alteração pode gerar economia no custo energético das dosagens da ordem de 24,77% para uma construção convencional em concreto armado.

Por fim, infere-se que o modelo híbrido ANFIS pode ser o aparato necessário para predição e economia energética, deixando o processo de produção de concretos mais sustentável. Ratificou-se com esta pesquisa a necessidade de estudos sobre o balanço energético no processo de produção de concretos ambientalmente sustentáveis, sendo as investigações quase sempre voltadas para a inserção de materiais não convencionais no concreto.

Referências

- ABOLPOUR, B. *et al.* Estimation of concrete compressive strength by a fuzzy logic model. **Research on Chemical Intermediates**, v. 39, n. 2, p. 707-719, 2013.
- AHMED, M. *et al.* A comparative study of popular concrete mix design methods from qualitative and cost-effective point of view for extreme environment. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 41, n. 4, p. 1403-1412, 2016.
- AL-GHANDOOR, A. An approach to energy savings and improved environmental impact through restructuring Jordan's transport sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 18, p. 31-42, 2013.
- AMASYALI, K.; EL-GOHARY, N. M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1192-1205, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: concreto de cimento Portland: preparo, controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, 2015c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos prova de concreto. Rio de Janeiro, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2015d.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica unitária e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BORGES, P. H. R. *et al.* Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 2, p. 153-168, abr./jun. 2014.

CAMPOS, A. T. *et al.* Custo energético de construção de uma instalação para armazenagem de feno. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 4, p. 667-672, 2003.

DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; DE ANDRADE, E. T. Comparative study of non-linear simulations of a reinforced concrete slender column using finite element method and p-delta. **Theoretical and Applied Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2019.

DEB, C. *et al.* A review on time series forecasting techniques for building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 902-924, 2017.

GONG, X. *et al.* Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in beijing. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, p. 576-587, 2012.

GUPTA, S. Use of triangular membership function for prediction of compressive strength of concrete containing nano-silica. **Cogent Engineering**, v. 2, n. 1, p. 1025578, 2015.

HATEM, M. *et al.* Design of concrete mixes by systematic steps and ANN. **Journal of Advanced Science and Engineering Research**, v. 2, n. 4, p. 232-251, 2012.

KNOERI, C.; SANYÉ-MENGUAL, E.; ALTHAUS, H.-J. Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 5, p. 909-918, 2013.

LI, K.; SU, H.; CHU, J. Forecasting building energy consumption using neural networks and hybrid neuro-fuzzy system: a comparative study. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2893-2899, 2011.

MATTIOLI, M. C. *et al.* Demanda energética na construção de galpão para frangos de corte modelo *Darkhouse*. **Energia na Agricultura, Botucatu**, v. 33, n. 3, p. 216-223, 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 837-844, 2015.

MOUSAVI-AVVAL, S. H. *et al.* Combined application of life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system for modeling energy and environmental emissions of oilseed production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 807-820, 2017.

NABAVI-PELESARAEI, A. *et al.* Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of paddy production. **Science of the Total Environment**, v. 631-673, p. 1279-1294, 2018.

NAJI, S. *et al.* Application of adaptive neuro-fuzzy methodology for estimating building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1520-1528, 2016.

OLATOMIWA, L. *et al.* Adaptive neuro-fuzzy approach for solar radiation prediction in Nigeria. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 51, p. 1784-1791, 2015.

SANTOS, A. G.; FERRARI, A. K. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 39-51, jul./set. 2019.

SANTOS, R. S. Energia incorporada na fase de pré-uso: comparação entre lajes *steel deck* e maciças. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 197-205, jul./set. 2019.

SHAIKH, P. H. *et al.* A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 409-429, 2014.

SHAMSHIRBAND, S. *et al.* Heat load prediction in district heating systems with adaptive neuro-fuzzy method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 760-767, 2015.

WANG, J. *et al.* Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1162-1174, 2017.

ZHANG, Z. Y.; WANG, B. Hybrid input-output analysis for life-cycle energy consumption and carbon emissions of China's building sector. **Building and Environment**, v. 104, p. 188-197, 2016.

Errata

No artigo “Modelo neuro-fuzzy para previsão do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações”, com número de DOI: <<http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000200527>>, publicado no periódico Ambiente Construído, 21(2):295-197.

Na página 300:

Onde se lia:

“Tabela 2 - Propriedades físicas dos agregados graúdos e miúdos”

Leia-se:

“Tabela 2 - Coeficientes energéticos dos componentes do concreto”

Na página 309:

Onde se lia:

“WANG, J. *et al.* Avaliação da sustentabilidade do ciclo de vida de estruturas de concreto com cinzas volantes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1162-1174, 2017.”

Leia-se:

“WANG, J. *et al.* Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1162-1174, 2017.”

Régis Marciano de Souza

Departamento de Engenharia Civil | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas | Av. Maria da Conceição Santos, 900, Parque Real, Campus Pouso Alegre | Pouso Alegre - MG - Brasil | CEP 37550-000 | Tel.: (35) 3427-6600 | E-mail: regis.souza@ifsuldeminas.edu.br

Ricardo Rodrigues Magalhães

Departamento de Automática | Universidade Federal de Lavras | Av. Sul, s/n, Aquecida Sol | Lavras - MG - Brasil | CEP 37200-900 | Tel.: (35) 3829-5234 | E-mail: ricardorm@ufla.br

Alessandro Torres Campos

Departamento de Engenharia Agrícola | Universidade Federal de Lavras | Lavras - MG - Brasil | Caixa Postal 3037 | CEP 37200-900 | Tel.: (35) 3829-1486 | E-mail: campos@ufla.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

**ARTIGO II - MODELO NEURO-FUZZY PARA PREDIÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂
DE DOSAGENS DE CONCRETO PARA BIODIGESTORES NA SUINOCULTURA**

Este artigo está formatado de acordo com as normas da "Ambiente Construído". É uma versão final, aceita pelo conselho editorial do periódico.

Modelo neuro-fuzzy para predição das emissões de CO₂ de dosagens de concreto para biodigestores na suinocultura

Neuro-fuzzy model for the prediction of CO₂ emissions of concrete mixes for biodigestors in swine production systems

Régis Marciano de Souza 
Ricardo Rodrigues Magalhães 
Alessandro Torres Campos 
Alessandro Vieira Veloso 

Resumo

Dada a importância da suinocultura para o Brasil, é necessário entender o impacto ambiental gerado pelos materiais de construção empregados na produção das instalações rurais, em especial na construção dos biodigestores, visto que essas instalações têm um importante papel na sustentabilidade dos sistemas de produção. Diante da relevância do volume de concreto empregado no processo de construção de biodigestores para manejo e tratamento de resíduos da suinocultura, esta pesquisa avaliou as emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂Eq.) em diferentes cenários de dosagens de concreto. Para isso, um modelo computacional ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) foi desenvolvido para predição e análise das emissões de CO₂Eq. durante o ciclo de vida dos materiais adotados em concretos convencionais. Os resultados indicam que a escolha adequada da dosagem pode gerar redução nas emissões de CO₂Eq. da ordem de 31,41% para concretos de 30 MPa a 40 MPa. Isso implica uma proposta promissora para a redução do impacto ambiental na produção de instalações em concreto, o que tem potencial para impulsionar novas pesquisas na área.

Palavras-chave: Emissões de dióxido de carbono. Sistema ANFIS. Concreto sustentável. Construções rurais. Instalações para suínos.

Abstract

Due to the importance of swine production in Brazil, there is a need to understand the environmental impact generated by the construction materials used in the production of rural facilities, especially in the construction of biodigesters, as these facilities play an important role in the sustainability of production systems. Considering the relevance of the volume of concrete used in the construction of biodigesters for the management and treatment of swine waste, this research study sought to evaluate the emissions of carbon dioxide equivalent (CO₂Eq.) in different concrete mix scenarios. For that purpose, a computational ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System) model was developed to predict and analyse CO₂Eq. emissions during the life cycle of materials adopted in conventional concrete. The results indicate that the proper choice of dosage can lead to a reduction of 31.41% in CO₂Eq. emissions, for concrete from 30 to 40 MPa. This represents a promising proposal for reducing the environmental impact of the production of concrete constructions, which has the potential to stimulate further research in this area.

¹Régis Marciano de Souza
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas
Pouso Alegre - MG - Brasil

²Ricardo Rodrigues Magalhães
Universidade Federal de Lavras
Lavras - MG - Brasil

³Alessandro Torres Campos
Universidade Federal de Lavras
Lavras - MG - Brasil

⁴Alessandro Vieira Veloso
Universidade Federal de Lavras
Lavras - MG - Brasil

Recebido em 10/06/21
Aceito em 20/12/21

Keywords: Carbon dioxide emissions. ANFIS system. Sustainable concrete. Rural buildings. Swine constructions.

Introdução

No Brasil, como em outros países, o concreto desempenha um importante papel no setor das construções. Por ser o material mais consumido no mundo, pode gerar impactos ambientais consideráveis. Esse tema está presente em estudos que abordam, entre outros, o consumo de energia e emissões de gases poluentes, desenvolvidos com a finalidade de aprimorar seu desempenho e identificar meios que garantam a redução dos impactos ambientais gerados pelo setor da construção civil (SINGH *et al.*, 2011). Ante o exposto, De Souza, Magalhães e Campos (2021) observaram que o quantitativo dos materiais empregados nas dosagens de concreto impacta diretamente no custo energético total para a implantação de construções. Por outro lado, De Wolf, Pomponi e Moncaster (2017) reportaram que, embora o consumo energético e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) estejam relacionados, não são diretamente equivalentes. Já Huang, Huang e Marcotullio (2019) relataram que, quanto mais energia acumulada na fabricação do material de construção, mais CO₂ está associado ao processo de construção. Su, Ang e Li (2019) corroboram que a energia incorporada e as emissões de gases têm sido amplamente utilizadas para medir, respectivamente, o desempenho geral do consumo de energia e a poluição ambiental do ponto de vista da produção. Assim, de acordo com Penadés-Plà, García-Segura e Yepes (2019), a otimização das emissões de CO₂ ou da energia incorporada tem relação direta com o custo monetário e pode gerar economia.

Asdrubali *et al.* (2020) relataram que a maioria dos países desenvolvidos está lutando para reduzir as emissões de carbono na atmosfera para atender a acordos internacionais. Para Purnell e Black (2012), a transição para uma infraestrutura de baixo carbono requer uma compreensão do carbono incorporado associado ao concreto. Ainda, segundo Purnell e Black (2012), muitos trabalhos subestimam a complexidade da emissão de CO₂ com o impacto na dosagem de concreto.

De acordo com Xiao *et al.* (2018), muitas pesquisas defendem como o uso de agregados reciclados pode ser ambientalmente sustentável devido à redução da necessidade de extração de recursos naturais, de aterros, de aporte de energia e de emissões de gases. No entanto, pouca atenção é dada às investigações dos efeitos da adoção de concreto com agregado reciclado como material estrutural na pegada de carbono de prédios altos em megacidades como Xangai. Os resultados dessa pesquisa indicaram que a adoção do concreto com agregado reciclado como material para construção de arranha-céus, substituindo o concreto com agregado natural, pode resultar em redução significativa na pegada de carbono. Para a estrutura proposta, a redução constatada foi de $2,175 \times 10^5$ kgCO₂, o que corresponde a uma redução de 7,93%. Dessa forma, os mesmos pesquisadores relataram que existe a necessidade de se otimizar a redução das emissões de gases na produção de concreto com agregado natural sem impactar na redução da captura de carbono.

Os materiais de construção com as maiores emissões de CO₂ por quilograma são o aço, o concreto armado e o vidro, seguidos por ladrilhos, madeira e concreto (HUANG; HUANG; MARCOTULLIO, 2019). Para Tulevech *et al.* (2018), o concreto é de longe o componente de construção responsável pelos maiores impactos ambientais em massa. Shoaie *et al.* (2020) verificaram que o quantitativo dos componentes empregados no concreto pode influenciar na emissão de CO₂ e na demanda de energia, e que o uso de pó de vidro como material substituto do cimento Portland pode reduzir as emissões de CO₂ e a demanda de energia das misturas. Atualmente, De Souza, Magalhães e Campos (2021) comprovaram a influência do quantitativo dos componentes na determinação da energia incorporada em dosagens de concreto convencionais de uma edificação. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência do modelo ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) para modelagem preditiva do comportamento de dosagens de concreto. Outros autores também encontraram bons resultados em análise de parâmetros ambientais para avaliação da sustentabilidade, entre eles Naji *et al.* (2016), Zhang e Wang (2016), Deb *et al.* (2017), Mousavi-Avval *et al.* (2017), Amasyali e El-Gohary (2018) e Nabavi-Pelesaraei *et al.* (2018).

O concreto também tem um importante papel nas instalações para suinocultura, uma vez que grande parte desse material é utilizada como forma de vedação e piso. Para De Souza, Magalhães e De Andrade (2019), esse é o principal e mais consumido material de construção no mundo, sendo parte desse material empregado em construções rurais. De acordo com o Departamento de Agricultura dos EUA (UNITED..., 2021), o Brasil é o quarto maior produtor de suínos e o quinto maior consumidor de carne suína no mundo, o que demonstra a importância das construções rurais para o agronegócio brasileiro. Segundo Xie, Ni e Su (2017), o emprego da lógica *fuzzy* pode proporcionar uma avaliação eficaz dos parâmetros de qualidade ambiental nas construções para suínos com base em múltiplos fatores. Quan *et al.* (2021) investiram esforços na redução das emissões de amônia e dióxido de carbono em uma construção para suínos. Brunetta *et al.* (2021) verificaram que é possível reduzir o consumo de energia em até 25% utilizando paredes de concreto armado moldadas *in loco* em relação à emissão de dióxido de carbono equivalente (CO₂Eq.). O mesmo estudo ainda constatou que é possível reduzir as emissões em quase 32% utilizando esse mesmo cenário em

sistemas de vedação para residências rurais. Esses resultados consolidam a importância do concreto para as construções rurais e reforçam a necessidade de mais estudos que possam contribuir para o desenvolvimento sustentável no âmbito das construções, incluindo o meio rural.

Nesse contexto, este trabalho propõe o uso do sistema ANFIS como forma alternativa para predição de dosagens de concreto convencional com menor emissão de CO₂Eq. na construção de um biodigestor para o manejo e tratamento de resíduos da suinocultura. Identificaram-se, para tanto, quais os componentes responsáveis pelas maiores emissões de CO₂Eq., no intuito de obter as correlações entre as variáveis e interpretar a relação entre dosagens de concretos eficientes em relação à emissão de CO₂Eq. e o quantitativo dos materiais empregados.

No âmbito mundial não existem trabalhos que correlacionem análise de emissões de CO₂Eq. e o quantitativo dos materiais empregados na produção de concretos abordando modelagem *neuro-fuzzy*, para um campo de diferentes dosagens, com a finalidade de execução de um sistema de biodigestores, o que indica a originalidade da pesquisa. Este trabalho ainda apresenta contribuições científicas para estudo de concretos sustentáveis, o que vem ao encontro de pesquisas sobre a avaliação do impacto ambiental das construções em concreto (GONG *et al.*, 2012; OLIVEIRA *et al.*, 2014; SANTORO; KRIPKA, 2016; DEB *et al.*, 2017; ALBUQUERQUE; LIRA; SPOSTO, 2018; MATTIOLI *et al.*, 2018; NABAVI-PELESARAEI *et al.*, 2018; SANTOS, 2019; SANTOS; FERRARI, 2019; BARBOZA; STORCH; ALMEIDA FILHO, 2020; BRUNETTA *et al.*, 2021, DE SOUZA; MAGALHAES; CAMPOS, 2021; LEÓN-VELEZ; GUILLÉN-MENA, 2020; QUAN *et al.*, 2021).

Materiais e métodos

O método de investigação adotado nesta pesquisa foi dividido em três etapas:

- (a) elaboração de um modelo adaptativo *neuro-fuzzy* (ANFIS) para predição das emissões de dióxido de carbono equivalente de diferentes cenários de dosagem, dentro do quantitativo de cada um dos componentes das dosagens;
- (b) utilização de coeficientes de literaturas para emissões de dióxido de carbono equivalente e banco de dados das diferentes dosagens de concreto de De Souza, Magalhães e Campos (2021); e
- (c) avaliação das emissões de dióxido de carbono equivalente para instalação de biodigestores para suinocultura, construção essa avaliada energeticamente por Veloso *et al.* (2018), processo construtivo apresentado na Figura 1 e modelo gráfico representado na Figura 2.

Características do biodigestor

Os biodigestores avaliados neste trabalho constituíam parte integrante de um sistema de produção de suínos de ciclo completo, localizado no município de Lavras, Minas Gerais, Brasil, tendo como principal função o manejo e tratamento de resíduos de um sistema de produção de suínos. O sistema trabalha com uma produção diária de 54,85 m³ de biomassa residual. Esses biodigestores foram projetados para um tempo de retenção hidráulica de 30 dias em sistema de operação contínua, conforme relatado por Veloso *et al.* (2018).

A metodologia proposta consiste na avaliação quantitativa das emissões de CO₂Eq. produzidas das diferentes dosagens de concreto para a implantação da estrutura do sistema de biodigestores. A instalação é destinada ao manejo e tratamento de resíduos produzidos pela suinocultura, composta de dois biodigestores. A parte subterrânea de cada biodigestor possui formato de tronco de pirâmide invertido, tendo a base menor (fundo do biodigestor) dimensões de 27x12 m, a base maior (superior) dimensões de 32x17 m e profundidade de 2,5 m, perfazendo o volume de 1.073,19 m³, sendo coberto com geomembranas flexíveis (gasômetros) de policloreto de vinila (PVC), que apresentam 1,0 mm de espessura. Para ancoragem dos gasômetros à construção foi feita uma fundação direta contínua de 0,50 m de profundidade e 0,20 m de largura. Veloso *et al.* (2018) verificaram que esse tipo de instalação apresenta custo energético de 7.622,68 MJ, em 11,83 m³ de concreto (Figura 2). Por haver relação explícita entre energia incorporada e emissões de CO₂ (HUANG; HUANG; MARCOTULLIO, 2019), buscou-se avaliar essa relação e o impacto nas emissões de CO₂Eq.

O material em estudo é o concreto convencional, produto da mistura de um aglomerante (cimento Portland), com agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e água. Nesta pesquisa, para a avaliação das diferentes possibilidades de dosagens, utilizaram-se dados de corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, preparados no município de Pouso Alegre, Minas Gerais, com água proveniente da rede de abastecimento público, agregados miúdos e graúdos caracterizados de acordo com as normas NBR NM 27

(ABNT, 2001), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 52 (ABNT, 2009a) e NBR NM 53 (ABNT, 2009b), e cimento Portland do tipo CP II E, classificado e padronizado conforme a norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018). Ao todo foram moldados 3 corpos de prova para cada uma das 101 dosagens experimentais (exemplares). Adotou-se como referência de cálculo o valor médio de cada exemplar. As dosagens foram moldadas em condições ambientalmente semelhantes, com adensamento manual com 2 camadas e 12 golpes por camada, utilizando processo de cura por imersão em água, conforme estabelecido na norma NBR 5738 (ABNT, 2015a), dados também utilizados por De Souza, Magalhães e Campos (2021).

Os dados de consistência das amostras foram obtidos por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone conforme a NBR NM 67 (ABNT, 1998), e a resistência mecânica à compressão dos corpos de prova capeados com neoprene foi obtida após 28 dias de cura por imersão em água, por ensaio de compressão axial utilizando máquina universal eletrônica digital com capacidade 100 t (hidráulica I-3058, da marca Pavitest), procedimentos regulamentados pela norma NBR 5739 (ABNT, 2015b).

Figura 1 - Etapas do processo construtivo dos biodigestores



(a) Escavação dos biodigestores

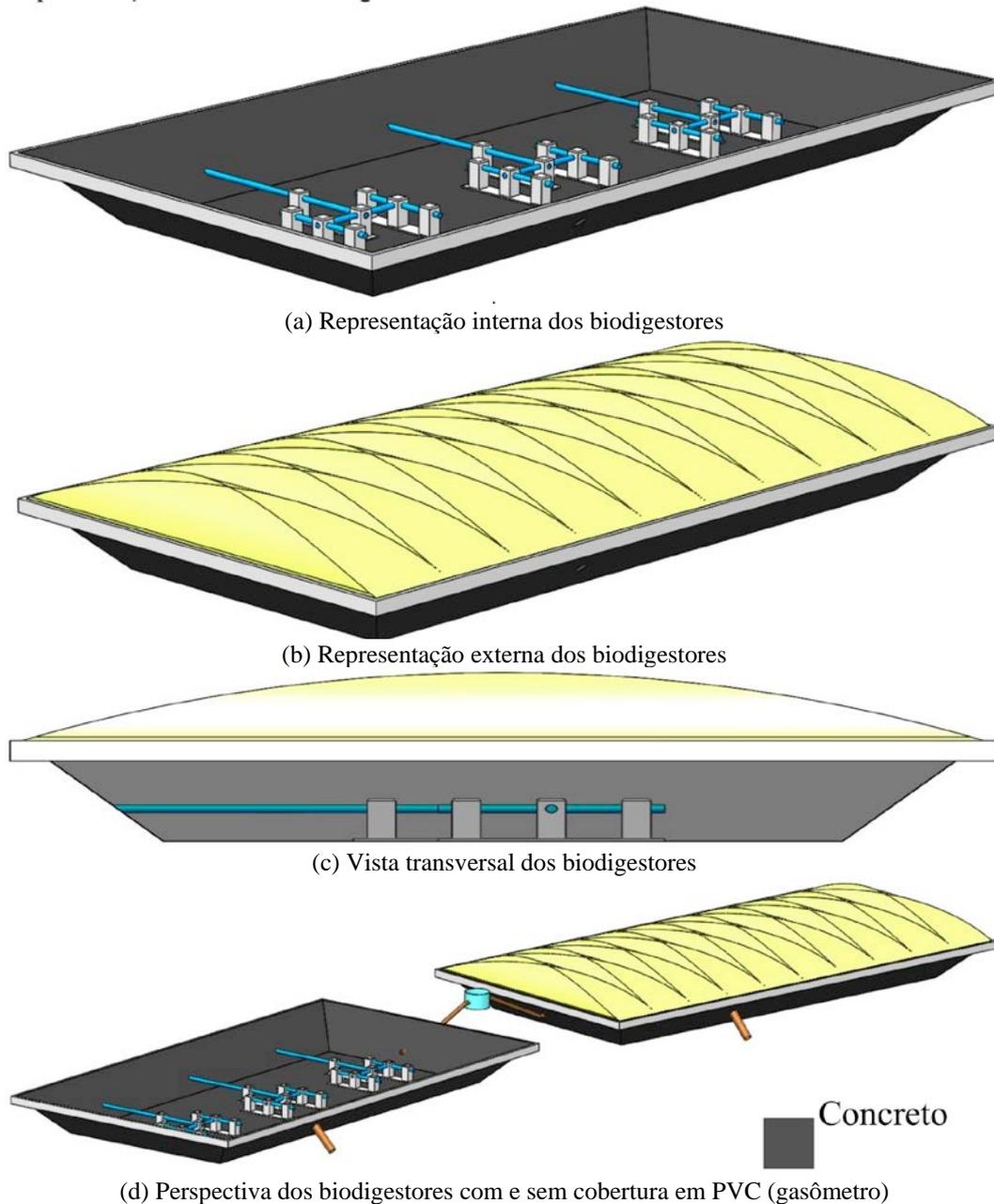


(b) Início das operações de enchimento dos biodigestores



(c) Biodigestores de modelo canadense implantados, com destaque para o gasômetro de PVC

Figura 2 - Modelagem gráfica dos biodigestores



Para uma representatividade do campo das dosagens, diferentes dosagens foram propostas, com uma unidade funcional de volume no Sistema Internacional de Unidades (1 m^3 de concreto). Cada um dos componentes constituintes das dosagens foi selecionado de forma a manter a resistência mecânica à compressão dentro de limites compatíveis com o comportamento de concretos convencionais (Tabela 2). No entanto, trabalhou-se com abatimentos na faixa de 0 a 245, o que pode inviabilizar a aplicação de algumas dosagens, conforme prescrevem as normas NBR 14931 (ABNT, 2004) e NBR 8953 (ABNT, 2015c). O domínio desses componentes no campo quantitativo das dosagens foi proposto por De Souza, Magalhães e Campos (2021). As diferentes propostas de dosagens foram avaliadas com relação às emissões de $\text{CO}_2\text{Eq.}$, considerando as etapas de extração da matéria-prima, transporte, fabricação, montagem, desmontagem e desconstrução durante o ciclo de vida do concreto, conforme dados contidos na Tabela 3.

Tabela 2 - Domínio dos componentes das dosagens propostas

Cimento Portland (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)
[380 – 595]	[155 – 270]	[800 – 1.150]	[180 – 735]

Tabela 3 - Coeficiente de emissões de CO₂Eq. dos componentes do concreto

Componentes	Emissões de CO ₂	Fonte
Cimento Portland	0,9300 kg de CO ₂ Eq./kg	Mithun e Narasimhan (2015)
Agregado graúdo	0,0048 kg de CO ₂ Eq./kg	Mithun e Narasimhan (2015)
Agregado miúdo	0,0051 kg de CO ₂ Eq./kg	Mithun e Narasimhan (2015)
Água	0,0008 kg de CO ₂ Eq./kg	Mithun e Narasimhan (2015)

Modelo *neuro-fuzzy*

Um modelo ANFIS foi desenvolvido para predição das emissões de CO₂Eq. na produção de concretos convencionais. Essa abordagem híbrida apresenta excelente precisão quando comparada com dados experimentais de propriedades mecânica de concreto (SARADAR *et al.*, 2020). Esse sistema híbrido utiliza RNA (*Artificial Neural Networks*) combinado com lógica *fuzzy* baseada no processo de inferência *fuzzy* de Takagi-Sugeno para definição das características do modelo *neuro-fuzzy* (Figura 3). Essa combinação permite conjugar a capacidade de aprendizado das redes neurais com as características do sistema *fuzzy*. A metodologia aplicada utilizou como apoio o software comercial MATLAB, na interface Fuzzy Logic Toolbox, com uso da função ANFIS e do aplicativo iterativo Neuro-Fuzzy Designer. Para alcançar melhores resultados, diferentes configurações de modelos ANFIS foram testadas.

No modelo, foram utilizados 675 parâmetros lineares, 28 parâmetros não lineares e 135 regras. Os valores discretos das variáveis de entrada foram convertidos em valores difusos (*fuzzification*), adotando quatro conjuntos *fuzzy* de entrada com funções de pertinência do tipo gaussiana. Os conjuntos *fuzzy* de entrada – agregado miúdo (kg de CO₂Eq./m³), agregado graúdo (kg de CO₂Eq./m³) e água (kg de CO₂Eq./m³) – foram modelados considerando três funções de pertinência (Figura 3). Para a representação da variável de entrada cimento (kg de CO₂Eq./m³) foram adotadas cinco funções de pertinência (Figura 3).

A metodologia utilizada para modelar o ANFIS foi compatível com as pesquisas de Li, Su e Chu (2011), Boğa, Öztürk e Topçu (2013), Shamshirband *et al.* (2015) e De Souza, Magalhães e Campos (2021). Utilizou-se a média ponderada de todas as saídas, por ser o padrão para os sistemas de inferência de Takagi-Sugeno. O modelo foi desenvolvido considerando os bancos de dados experimentais e de validação disponibilizados por De Souza, Magalhães e Campos (2021), de acordo com os limites da Tabela 2.

Optou-se ainda por avaliar as emissões de CO₂Eq. da produção do concreto necessário para produção da instalação dos biodigestores, considerando os diferentes cenários de dosagens em intervalos de 10 MPa, avaliando, dessa forma, as dosagens preponderantes (máxima e mínima emissão de CO₂Eq.), procedimento esse adotado por De Souza, Magalhães e Campos (2021) ao avaliar o impacto ambiental devido à energia incorporada. Os resultados obtidos foram discutidos e apresentados em gráficos de superfície.

Desempenho estatístico do modelo de predição ANFIS

O desempenho estatístico do modelo híbrido *neuro-fuzzy* adaptativo foi avaliado computacionalmente por meio dos indicadores de desempenho, coeficiente de variação (CV), erro percentual absoluto médio (MAPE), coeficiente de determinação (R²) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), conforme proposto por De Souza, Magalhães e Campos (2021) (Equações 1 a 4).

$$CV (\%) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{c,i})^2}{n}} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$MAPE (\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{p,i} - y_{c,i}}{y_{c,i}} \right| \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{c,i})^2}{\sum_{i=1}^n (y_{c,i} - \bar{y}_c)^2} \quad \text{Eq. 3}$$

$$RMSE \text{ (kg de CO}_2\text{Eq.)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{p,i} - y_{c,i})^2}{n}} \tag{Eq. 4}$$

Em que:

$y_{p,i}$: valor previsto das emissões de CO₂Eq. no instante i em kg de CO₂Eq.;

$y_{c,i}$: valor conhecido das emissões de CO₂Eq. no instante i em kg de CO₂Eq.; e

\bar{y}_c : média dos valores conhecidos das emissões de CO₂Eq. (em kg) para n dados.

Resultados e discussão

Desempenho do modelo híbrido *neuro-fuzzy*

Os resultados revelaram boa precisão do modelo ANFIS para predição de diferentes cenários de dosagens de concreto, desempenho caracterizado por um CV de 0,0019%, MAPE de 0,0011%, R² de 1,0000 e RMSE de 0,0086 kg de CO₂Eq. (Tabela 4). Na etapa de validação, os resultados foram semelhantes, descritos por CV de 0,3947%, MAPE de 0,1422%, R² de 0,9989 e RMSE de 1,7899 kg de CO₂Eq. (Tabela 4), com divergência relativa média de 0,14%. Sob o viés do parâmetro R², o modelo revelou boa convergência na validação, que pode ser observada no gráfico da Figura 4.

Nesta pesquisa, os resultados foram semelhantes aos obtidos por De Souza, Magalhães e Campos (2021) ao avaliar predições ANFIS para energia incorporada em concretos, resultados equivalentes aos relatados por Amasyali e El-Gohary (2018). Observou-se divergência máxima relativa de 2,39% ao predizer cenário proposto por Hatem *et al.* (2012), dados no intervalo de 400 kg a 450 kg de CO₂ (Figura 4), o que pode ser devido às diferentes características dos concretos adotados nas pesquisas, conforme relatado por De Souza, Magalhães e Campos (2021).

Emissões de dióxido de carbono equivalente do concreto dos biodigestores

Os dados de emissões de CO₂Eq. por dosagem foram correlacionados com a ordenação crescente da resistência mecânica à compressão dos diferentes cenários de dosagens experimentais (Figura 5). Observou-se ainda que valores semelhantes de resistência mecânica à compressão podem gerar mudanças abruptas nas emissões de CO₂Eq. em função do quantitativo dos materiais empregados nas misturas, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 3 - Configuração geral do modelo ANFIS

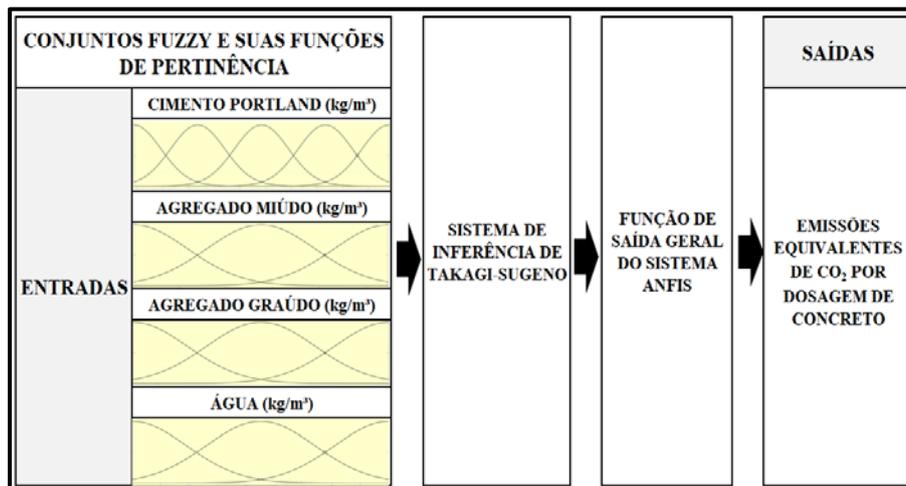


Tabela 4 - Desempenho estatístico do modelo ANFIS

Etapa	CV (%)	MAPE (%)	R ²	RMSE (kg de CO ₂ Eq.)
Treinamento	0,0019	0,0011	1,0000	0,0086
Validação	0,3947	0,1422	0,9989	1,7899

Figura 4 - Dispersão de dados reais e previstos pelo ANFIS

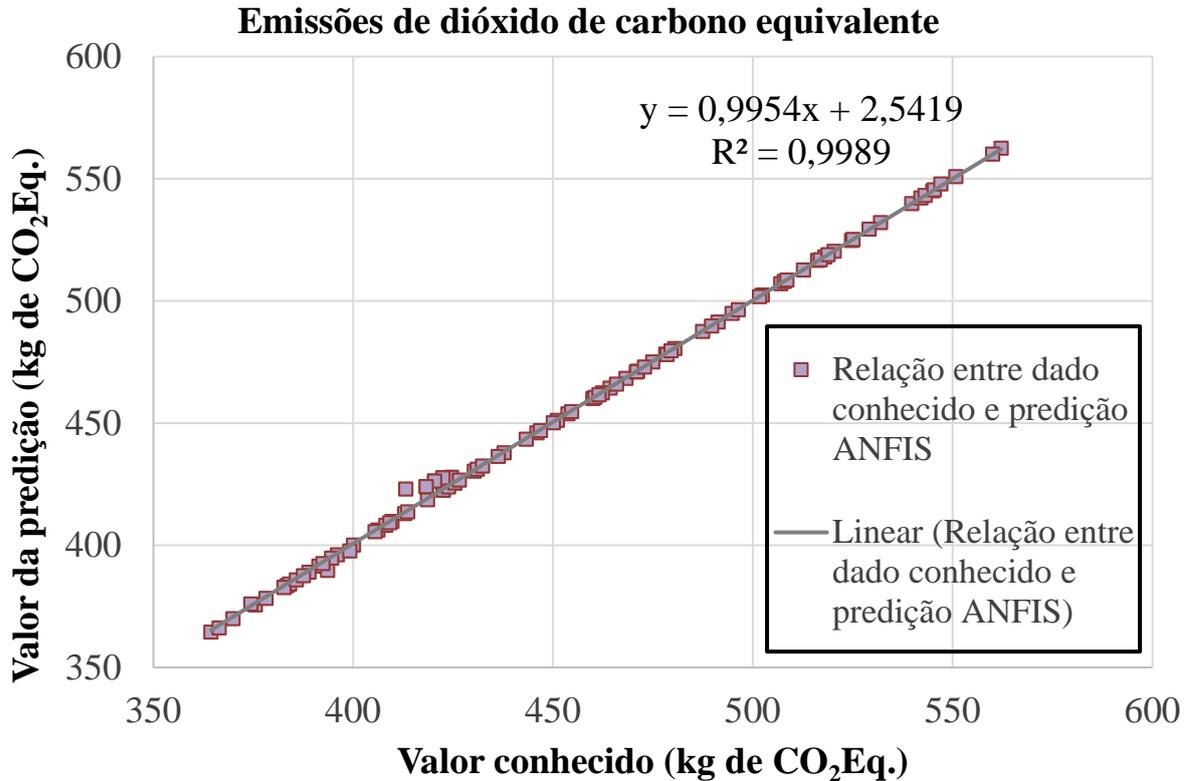
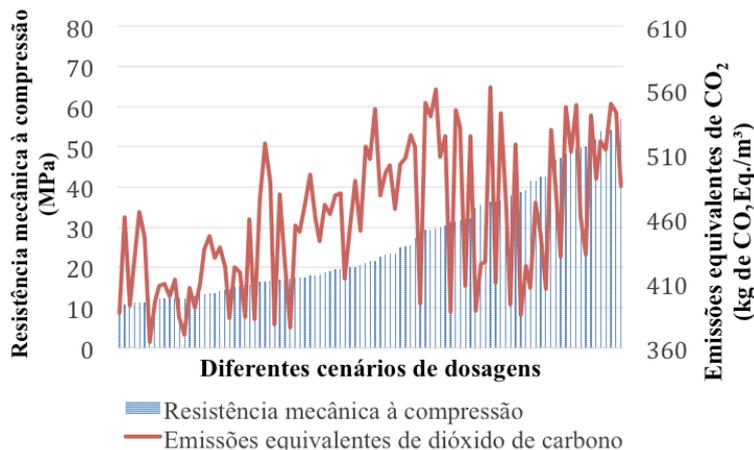


Figura 5 - Relação entre emissões de CO₂Eq. e a resistência mecânica à compressão dos corpos de provas



Para diferentes faixas de resistência mecânica à compressão, a escolha da dosagem adequada pode gerar redução no impacto ambiental das emissões de CO₂Eq. Essa redução para a instalação rural dos biodigestores propostos pode chegar a um valor de 31,41% para concretos de 30 MPa a 40 MPa. Para concretos com resistência mecânica à compressão na faixa de 40 MPa a 50 MPa, essa redução foi um pouco menor, em torno de 26,24%, conforme representado na Figura 6. Diante dos resultados obtidos, fica evidente que a escolha adequada da dosagem pode influenciar significativamente na sustentabilidade do processo de produção de instalações rurais em concreto, informação essa ratificada por De Souza, Magalhães e Campos (2021).

Independentemente das faixas de resistência mecânica à compressão estudadas, as reduções nas emissões de CO₂Eq. são significativas, conforme mostrado na Figura 6. As aplicações dessas dosagens em construções rurais ou civis podem ser estruturais ou não. Concretos com resistência mecânica à compressão entre 10

MPa e 20 MPa devem ser utilizados de acordo com as limitações da norma NBR 8953 (ABNT, 2015c). Ainda, a escolha da dosagem de concreto a ser adotada em biodigestores e, conseqüentemente, da consistência do concreto deve atender aos requisitos de projeto da estrutura e às condições de trabalhabilidade necessárias, conforme recomendado pela norma NBR 14931 (ABNT, 2004). Para Huang, Huang e Marcotullio (2019), existe relação entre as emissões de CO₂Eq. e a energia incorporada nos materiais, informação essa verificada nesta pesquisa. O cimento Portland é o responsável pelo maior impacto ambiental nas dosagens, assim como relatado por Wang *et al.* (2017) e De Souza, Magalhães e Campos (2021), com valor médio de 98,40% do total das emissões de CO₂Eq. Observou-se que o agregado graúdo ocupa a segunda posição de destaque, com valor médio de 1,03% das emissões de CO₂Eq. Identificou-se ainda que o agregado miúdo é responsável por um valor médio de 0,53% do total das emissões de CO₂Eq. O componente água apontou um percentual médio de 0,04% do total das emissões de CO₂Eq.

Na Tabela 5 estão apresentadas as dosagens que se destacaram sob o aspecto impacto nas emissões de CO₂Eq. para distintos intervalos de resistência mecânica à compressão. Observou-se que o quantitativo dos materiais pode influenciar significativamente no impacto ambiental, nas características de resistência mecânica à compressão e no abatimento. Demonstrou-se ainda que a escolha da dosagem adequada pode ser estabelecida considerando diferentes aspectos técnicos e buscando um desenvolvimento mais sustentável.

Figura 6 - Emissões de CO₂Eq. do concreto dos biodigestores para o sistema de tratamento de resíduos da suinocultura

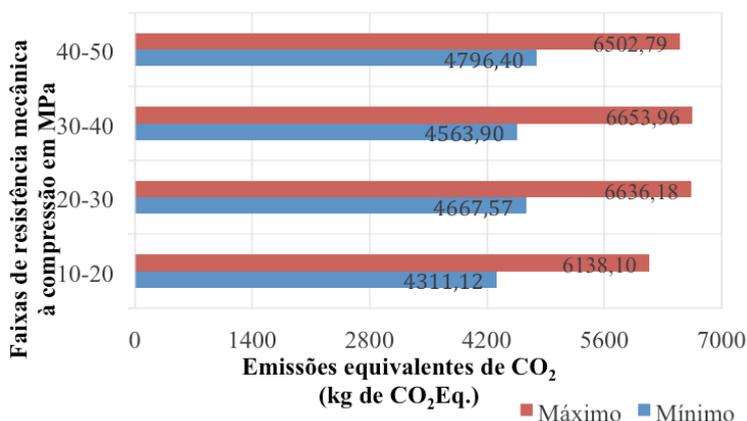
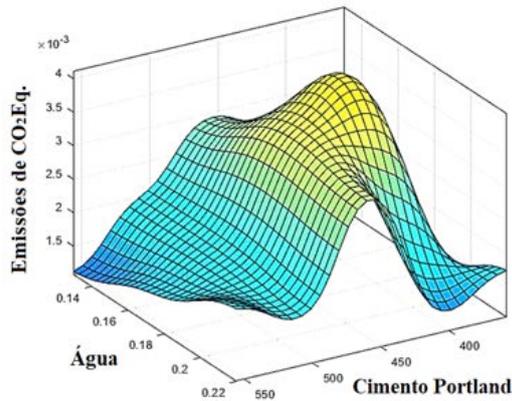


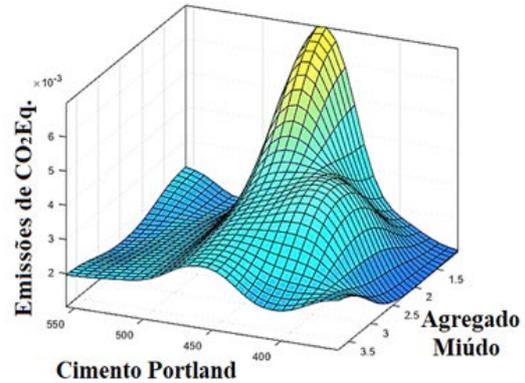
Tabela 5 - Dosagens com maiores efeitos no desempenho ambiental

Mistura	Unidade funcional 1 m ³ de concreto				Ensaio experimental		Impacto ambiental
	Cimento Portland (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado graúdo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Abatimento slump test (mm)	Resistência mecânica à compressão (MPa)	Emissões de carbono (kg de CO ₂ Eq./m ³)
D01	495,00	250,00	850,00	260,00	225	11,17	465,91
D02	384,62	322,60	1.023,39	210,61	215	12,00	364,42
D03	550,00	450,00	1.010,00	270,00	215	16,40	518,86
D04	395,05	600,20	1.031,57	224,44	185	17,10	375,59
D05	415,00	640,00	1.085,00	165,00	0	28,00	394,55
D06	595,00	480,00	1.035,00	245,00	155	29,60	560,96
D07	597,84	420,10	863,20	235,46	145	36,30	562,47
D08	405,66	734,20	965,89	182,68	15	38,60	385,79
D09	430,31	443,30	878,76	178,16	55	41,60	406,81
D10	427,70	722,50	801,49	188,58	15	42,70	405,44
D11	583,27	626,40	812,87	185,70	0	54,30	549,69

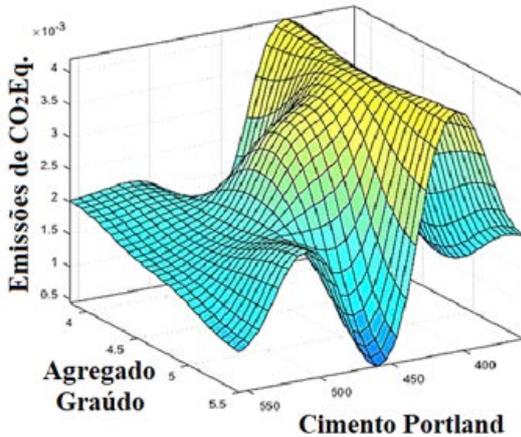
Figura 7 - Gráfico de superfície para predição das emissões de CO₂Eq. de diferentes combinações de misturas de concreto



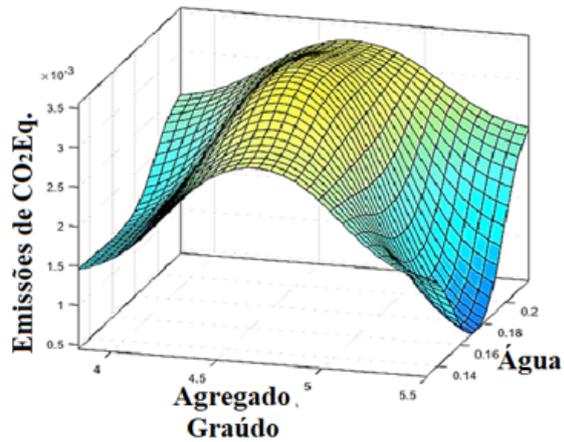
(a) Água x cimento



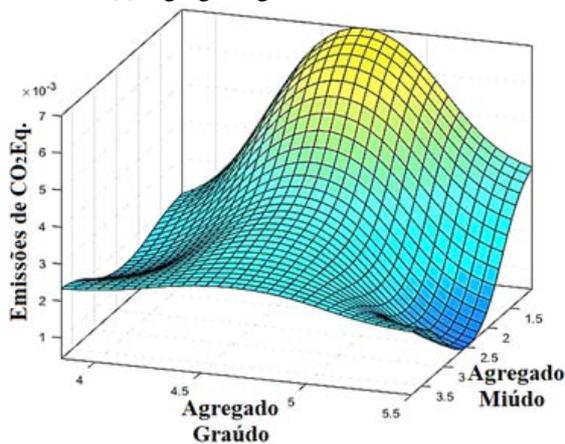
(b) Agregado miúdo x cimento



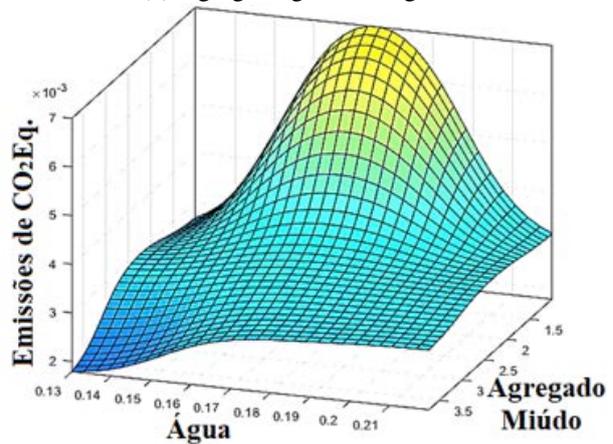
(c) Agregado graúdo x cimento



(d) Agregado graúdo x água



(e) Agregado miúdo x agregado graúdo



(f) Água x agregado miúdo

As interações entre as variáveis de entrada (cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água) e as emissões de CO₂Eq. (resposta de saída do sistema) estão apresentadas na Figura 7, com as variáveis de entrada e saída em unidades de kg de CO₂Eq./m³. Os gráficos da Figura 7 representam a variação do fenômeno físico de emissões de CO₂Eq. para diferentes misturas de concreto. Trabalhou-se com gráficos tridimensionais, que expressam as variações das entradas em função da resposta de saída do sistema. Por se tratar de um modelo com quatro entradas (cimento Portland, agregado miúdo, agregado graúdo e água), os gráficos da Figura 7 representam diferentes combinações, considerando duas variáveis de entrada como referência e os pontos médios de seus respectivos intervalos para as variáveis restantes, por ser o padrão adotado em sistemas *fuzzy*. Por exemplo, a Figura 7(a) retrata a variação da emissão de CO₂Eq. para

dosagens com diferentes misturas de água e cimento, considerando valores médios de emissões de 2,375 kg de CO₂Eq./m³ para agregado miúdo e de 4,67 kg de CO₂Eq./m³ para agregado graúdo. Para os demais casos, quando necessário, consideraram-se os valores médios de 456,8 kg de CO₂Eq./m³ de cimento Portland, de 2,375 kg de CO₂Eq./m³ de agregado miúdo, de 4,67 kg de CO₂Eq./m³ de agregado graúdo e de 0,175 kg de CO₂Eq./m³ do componente água.

Conclusões

Devido à importância da sustentabilidade nos processos agrícolas, investigou-se o uso de modelagem híbrida ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) para predição do impacto ambiental gerado pelas emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂Eq.) para a produção de concretos convencionais de um sistema de biodigestores da suinocultura.

Os resultados indicam que a metodologia proposta possui bom desempenho sob o viés estatístico coeficiente de variação (CV), erro percentual absoluto médio (MAPE), coeficiente de determinação (R²) e raiz quadrada do erro médio (RMSE), podendo ser o aparato necessário para a escolha adequada do quantitativo de materiais necessários para a produção de instalações sustentáveis em concreto, com potencial para ser utilizada na tomada decisão em projetos de engenharia.

Verificou-se que o estudo das emissões de CO₂Eq. pode ser a ferramenta adequada para avaliar a sustentabilidade ambiental de construções em concreto, sendo o material cimento o preponderante para a poluição do ar.

Conclui-se com este estudo que podem ocorrer variações significativas nas emissões de CO₂Eq. Essas variações podem ser reduzidas em até 31,41% com a escolha adequada da dosagem a ser utilizada para uma construção convencional de biodigestores em concreto. Ratificou-se ainda que existe uma relação entre as emissões de CO₂Eq. e a energia incorporada nos materiais de construção da produção de concretos.

Referências

ALBUQUERQUE, H. R.; LIRA, J.; SPOSTO, R. M. Emissões de CO₂ de sistemas de revestimento de argamassa: estudo de caso de aplicação de argamassa projetada comparativamente à aplicação convencional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 377-393, out./dez. 2018.

AMASYALI, K.; EL-GOHARY, N. M. A review of data-driven building energy consumption prediction studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 1192-1205, 2018.

ASSDRUBALI, F. *et al.* Dynamic life cycle assessment modelling of a NZEB building. **Energy**, v. 191, p. 116489, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14931**: execução de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland: requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos prova de concreto. Rio de Janeiro, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2015b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: agregados: determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica unitária e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009b.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.
- BARBOZA, L. da S.; STORCH, I. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. de. Concreto autoadensável ecoeficiente com baixo consumo de cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 59-71, abr./jun. 2020.
- BOĞA, A. R.; ÖZTÜRK, M.; TOPÇU, İ. B. Using ANN and ANFIS to predict the mechanical and chloride permeability properties of concrete containing GGBFS and CNI. **Composites Part B: Engineering**, v. 45, n. 1, p. 688-696, 2013.
- BRUNETTA, R. F. da S. *et al.* Life cycle energy assessment and carbon dioxide emissions of wall systems for rural houses. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 37-50, jan./mar. 2021.
- DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; CAMPOS, A. T. Modelo neuro-fuzzy para previsão do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 295-309, abr./jun. 2021.
- DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; DE ANDRADE, E. T. Comparative study of non-linear simulations of a reinforced concrete slender column using finite element method and p-delta. **Theoretical and Applied Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2019.
- DE WOLF, C.; POMPONI, F.; MONCASTER, A. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: a review and critique of current industry practice. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 68-80, 2017.
- DEB, C. *et al.* A review on time series forecasting techniques for building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 902-924, 2017.
- GONG, X. *et al.* Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing. **Journal of Industrial Ecology**, v. 16, p. 576-587, 2012.
- HATEM, M. *et al.* Design of concrete mixes by systematic steps and ANN. **Journal of Advanced Science and Engineering Research**, v. 2, n. 4, p. 232-251, 2012.
- HUANG, P.-J. J.; HUANG, S.-L. L.; MARCOTULLIO, P. J. Relationships between CO₂ emissions and embodied energy in building construction: a historical analysis of Taipei. **Building and Environment**, v. 155, p. 360-375, apr. 2019.
- LEÓN-VELEZ, A.; GUILLÉN-MENA, V. Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 611-625, 2020.
- LI, K.; SU, H.; CHU, J. Forecasting building energy consumption using neural networks and hybrid neuro-fuzzy system: a comparative study. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2893-2899, 2011.
- MATTIOLI, M. C. *et al.* Demanda energética na construção de galpão para frangos de corte modelo Darkhouse. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 33, n. 3, p. 216-223, 2018.
- MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, n. 112, p. 837-844, 2015.
- MOUSAVI-AVVAL, S. H. *et al.* Combined application of life cycle assessment and adaptive neuro-fuzzy inference system for modeling energy and environmental emissions of oilseed production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 78, p. 807-820, 2017.
- NABAVI-PELESARAEI, A. *et al.* Integration of artificial intelligence methods and life cycle assessment to predict energy output and environmental impacts of paddy production. **Science of the Total Environment**, v. 631/673, p. 1279-1294, 2018.
- NAJI, S. *et al.* Application of adaptive neuro-fuzzy methodology for estimating building energy consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 1520-1528, 2016.
- OLIVEIRA, V. C. H. C. *et al.* Estratégias para a minimização da emissão de CO₂ de concretos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 167-181, out./dez. 2014.
- PENADÉS-PLÀ, V.; GARCÍA-SEGURA, T.; YEPES, V. Accelerated optimization method for low-embodied energy concrete box-girder bridge design. **Engineering Structures**, v. 179, p. 556-565, 2019.
- PURNELL, P.; BLACK, L. Embodied carbon dioxide in concrete: variation with common mix design parameters. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 6, p. 874-877, 2012.

- QUAN, X. *et al.* New horizons in the application of a neglected biomass pyrolysis byproduct: a marked simultaneous decrease in ammonia and carbon dioxide emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, p. 126626, 2021.
- SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias-primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 35-49, abr./jun. 2016.
- SANTOS, A. G.; FERRARI, A. K. Influência do resíduo de PVC como agregado no concreto para peças de pavimentos intertravados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 39-51, jul./set. 2019.
- SANTOS, R. S. Energia incorporada na fase de pré-uso: comparação entre lajes *steel deck* e maciças. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 197-205, jul./set. 2019.
- SARADAR, A. *et al.* Prediction of mechanical properties of lightweight basalt fiber reinforced concrete containing silica fume and fly ash: experimental and numerical assessment. **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 101732, 2020.
- SHAMSHIRBAND, S. *et al.* Heat load prediction in district heating systems with adaptive neuro-fuzzy method. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 48, p. 760-767, 2015.
- SHOAEI, P. *et al.* Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated slag mortar: a comprehensive comparative study. **Construction and Building Materials**, v. 251, p. 118991, 2020.
- SINGH, A. *et al.* Review of life-cycle assessment applications in building construction. **Journal of Architectural Engineering, American Society of Civil Engineers**, v. 17, n. 1, p. 15-23, 2011.
- SU, B.; ANG, B. W.; LI, Y. Structural path and decomposition analysis of aggregate embodied energy and emission intensities. **Energy Economics**, v. 83, p. 345-360, 2019.
- TULEVECH, S. M. *et al.* Life cycle assessment: a multi-scenario case study of a low-energy industrial building in Thailand. **Energy and Buildings**, v. 168, p. 191-200, 2018.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Foreign agricultural service**. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline>. Acesso em: 31 mar. 2021.
- VELOSO, A. V. *et al.* Custo energético de construção de biodigestores para o manejo e tratamento de resíduos da suinocultura. **Energia na Agricultura**, v. 33, n. 4, p. 330-337, 2018.
- WANG, J. *et al.* Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1162-1174, 2017.
- XIAO, J. *et al.* A Recycled aggregate concrete high-rise building: structural performance and embodied carbon footprint. **Journal of Cleaner Production**, v. 199, p. 868-881, 2018.
- XIE, Q.; NI, J. Q.; SU, Z. Fuzzy comprehensive evaluation of multiple environmental factors for swine building assessment and control. **Journal of Hazardous Materials**, v. 340, p. 463-471, 2017.
- ZHANG, Z. Y.; WANG, B. Hybrid input-output analysis for life-cycle energy consumption and carbon emissions of China's building sector. **Building and Environment**, v. 104, p. 188-197, 2016.

Régis Marciano de Souza

Departamento de Engenharia Civil | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas | Av. Maria da Conceição Santos, 900, Parque Real, Campus Pouso Alegre | Pouso Alegre - MG - Brasil | CEP 37550-000 | Tel.: (35) 3427-6600 | E-mail: regis.souza@ifsuldeminas.edu.br

Ricardo Rodrigues Magalhães

Departamento de Engenharia | Universidade Federal de Lavras | Campus Universitário | Lavras - MG - Brasil | CEP 37200-900 | Tel.: (35) 3829-5234 | E-mail: ricardom@ufla.br

Alessandro Torres Campos

Departamento de Engenharia | Universidade Federal de Lavras | Tel.: (35) 3829-1486 | E-mail: campos@ufla.br

Alessandro Vieira Veloso

Departamento de Engenharia | Universidade Federal de Lavras | Tel.: (35) 3829-1490 | E-mail: alessandro.veloso@ufla.br

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.

ARTIGO III - ECOEFICIÊNCIA DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS COM RESÍDUO DE LOUÇA SANITÁRIA

Este artigo está formatado de acordo com as normas da "Ambiente Construído". É uma versão submetida ao conselho editorial do periódico.

1 Ecoeficiência de concretos autoadensáveis com resíduo de louça sanitária

2 Eco-efficiency of self-compacting concrete with sanitary ware waste

3 RESUMO

4
5 O resíduo de louça sanitária (RLS) é alvitado como uma alternativa ecologicamente ambiental,
6 em substituição aos agregados finos e pedriscos, empregados na produção de concretos
7 autoadensáveis (CAA). A eficiência ambiental nos ciclos de vida energético e das emissões de
8 dióxido de carbono de CAA com diferentes misturas de RLS, foram comparadas com o
9 concreto autoadensável sem RLS (CAA_REF). A Análise do Ciclo de Vida (ACV) evidenciou
10 que a substituição de agregados de RLS em CAA_REF, pode gerar uma redução absoluta de
11 aproximadamente 45,42 MJ/m³ e 2,67 kg de CO₂/m³, respectivamente, o que corresponde a
12 reduções de 2,2% e 0,6%. Verificou-se ainda que o uso de um indicador de ecoeficiência do
13 comportamento ambiental em relação ao parâmetro resistência mecânica à compressão, pode
14 contribuir e ser adequado em projetos de dosagens de CAA. Assim, observou-se que o uso de
15 RLS, pode colaborar para a sustentabilidade ambiental, reduzindo a disposição inadequada dos
16 RLS no meio ambiente e implementado um reuso adequado.

17 **Palavras-chave:** Avaliação do ciclo de Vida (ACV), Energia incorporada, Emissões de dióxido
18 de carbono, Concreto sustentável.

19 ABSTRACT

20
21 Sanitary ware waste (RLS) is proposed as an ecologically environmental alternative, replacing
22 fine aggregates and gravel, used in the production of self-compacting concrete (SCC). The
23 environmental efficiency in energy life cycles and carbon dioxide emissions of SCC with
24 different mixtures of RLS, were compared with the self-compacting concrete without RLS
25 (CAA_REF). The Life Cycle Assessment (LCA) showed that the replacement of RLS
26 aggregates in CAA_REF, can generate an absolute reduction of approximately 45.42 MJ/m³
27 and 2.67 kg of CO₂/m³ respectively, which corresponds to reductions of 2.2% and 0.6%. It was
28 also verified that the use of an indicator of eco-efficiency of the environmental behavior in
29 relation to the parameter mechanical resistance to compression, can contribute and be adequate
30 in projects of dosages of SCC. Thus, it was observed that the use of RLS can contribute to
31 environmental sustainability, reducing the inadequate disposal of RLS in the environment and
32 implementing an adequate reuse.

33 **Keywords:** Life Cycle Assessment (LCA), Embodied energy, Carbon dioxide emissions,
34 Sustainable concrete.

35 1 INTRODUÇÃO

36 Os compósitos cimentícios estão entre os materiais mais utilizados em todo mundo. Seu
37 processo de produção consome grandes quantidades de recursos naturais, demanda grande
38 quantidade de energia e gera montantes relevantes de gases geradores do efeito estufa (GGE),
39 principalmente, de dióxido de carbono. Pesquisas que buscam a melhoria tecnológica dos
40 compósitos cimentícios, visando reduzir os impactos ambientais, cada vez mais, têm recebido
41 a atenção dos pesquisadores (KOENDERS, PEPE e MARTINELLI, 2014).

42 A indústria de concreto, em especial, a de concreto autoadensável (CAA), apresenta-se com
43 grande potencial para substituição de matérias primas naturais e cimento por resíduos de outros
44 setores produtivos. A adição de materiais alternativos na composição de CAA, com vista ao

45 atendimento dos requisitos técnicos, econômicos e ambientais (GESOGLU *et al.*, 2017; SUA-
46 IAM e MAKUL, 2017).

47 De acordo com Metha e Monteiro (2014), o CAA difere do concreto convencional,
48 principalmente, por apresentar características reológicas melhoradas. Um concreto para ser
49 considerado autoadensável deve apresentar, simultaneamente, fluidez, habilidade passante e
50 resistência à segregação (BIBM - *The European Precast Concrete Organisation et al.*, 2005).
51 As amplas possibilidades de aplicação, com vantagens sobre o concreto convencional, fazem
52 que o CAA ganhe cada vez mais espaço na indústria da construção (SHARMA e KHAN, 2018).
53 O uso do CAA permite a obtenção de superfícies lisas com bom acabamento e o preenchimento
54 completo de fôrmas com geometrias complexas sem a necessidade de vibração (TENNICH,
55 KALLEL e BEN OUEZDOU, 2015). Assim, o CAA pode ser utilizado para melhorar a
56 eficiência do processo de concretagem de elementos de concreto com altas taxas de armaduras
57 ou estreitos, e garantir que o concreto preencha todas as regiões concretadas com pouca ou
58 nenhuma segregação (SUA-IAM e MAKUL, 2017).

59 O Brasil está entre os 5 maiores produtores de louça sanitárias do mundo, com produção anual
60 de 22 milhões de peças (ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para
61 Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, 2021). Para Cabral Junior *et al.* (2019), peças
62 reprovadas após a queima, sem a possibilidade de reparo, representam uma das principais
63 perdas para as indústrias. O volume de perdas representa entre 6%, para plantas mais eficientes
64 e 20% para plantas menos eficientes do total de peças produzidas (CABRAL JUNIOR *et al.*,
65 2010). Estes resíduos, denominados de refugos queimados, cacos, ou ainda *pitcher*, em sua
66 maioria são descartados em aterros sanitários, o que gera um grande passivo ambiental. Neste
67 trabalho, estes resíduos serão denominados por resíduos de louça sanitária (RLS).

68 O uso de RLS em concretos vem sendo debatido pela comunidade acadêmica, com foco na
69 melhoria das propriedades físicas do concreto, bem como os possíveis ganhos ambientais e
70 econômicos. Para Almeida *et al.* (2019), os concretos com RLS apresentam resistências à
71 compressão satisfatórias, incluindo a dosagem com 100% de RLS. Outro aspecto observado
72 nos modos de ruptura dos corpos de prova foi a pequena adesão entre o resíduo de louça
73 sanitária e a argamassa devido à camada de esmalte no contorno do resíduo (ALMEIDA *et al.*,
74 2019).

75 Embora estes trabalhos cite possíveis ganhos ambientais com a incorporação dos resíduos,
76 não foram encontrados artigos que de fato quantifiquem estes ganhos. Para Shoaie *et al.* (2020),
77 De Souza, Magalhães e Campos (2021) e De Souza *et al.* (2022), o quantitativo dos materiais
78 agregados em diferentes dosagens podem ter o seu impacto ambiental avaliado pela energia
79 incorporada (embutida) e correspondentes emissões de dióxido de carbono (CO₂), informação
80 evidenciada por Mithun e Narasimhan (2016), Chastas *et al.* (2018) e Huang, Huang e
81 Marcotullio (2019). Contudo, para De Wolf, Pomponi e Moncaster (2017), embora exista uma
82 relação entre o consumo energético e as emissões de dióxido de carbono (CO₂), eles não são
83 considerados equivalentes, o que reforça a importância de estudo combinado destes
84 indicadores.

85 As demandas de energia e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) são de grande importância
86 para as construções em concreto, e podem ser mensurados pela Avaliação do Ciclo de Vida
87 Energético (ACVE) e pela Avaliação do Ciclo de Vida das Emissões de CO₂ (ACVCO₂). A
88 Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma metodologia apropriada para avaliação ambiental
89 quantitativa de materiais (DE SOUZA, MAGALHÃES e CAMPOS, 2021; e DE SOUZA *et al.*,
90 2022).

91 O trabalho propõe mensurar os impactos ambientais nos ciclos de vida energético e das
92 emissões de CO₂, de acordo com os procedimentos padronizados da ACV, propostos pelas
93 normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014). Desse modo, essa
94 pesquisa propõe verificar se de acordo com ACVE e ACVCO₂, existe algum ganho ambiental

95 na substituição de agregado natural por RLS, proposta original e promissora no estudo da
96 sustentabilidade ambiental de concretos.

97 98 2 MATERIAIS E MÉTODOS

99 O desenvolvimento metodológico desta pesquisa foi estruturado da seguinte forma:

100 - 1º Parte: Apresentação das características dos materiais adotados;

101 - 2º Parte: Estabelecimento das dosagens de CAA, classificações e ensaios, e;

102 - 3º Parte: Estruturação da avaliação do comportamento ambiental nos ciclos de vida energético
103 e das emissões de dióxido de carbono, respectivamente ACVE e ACVCO₂.

104 105 2.1 Caracterização dos materiais

106 Os materiais utilizados para fabricação dos concretos foram: Cimento Portland tipo CP-V –
107 ARI (ABNT NBR 16697, 2018), aditivo redutor de água MC-TechniFlow 520 do tipo II (ABNT
108 NBR 11768-1, 2019), água da rede municipal de abastecimento e agregados em diferentes
109 faixas granulométricas de origem naturais e reciclados da indústria de louça sanitária, segundo
110 dados da Tabela 1.

111 Os RLS foram obtidos partir de peças de louças sanitárias que após o processo de queima para
112 fabricação não foram aprovadas no controle de qualidade, sendo destruídas para descarte,
113 Figura 1. Estes resíduos são compostos em sua maior parte, (cerca de 70%) por dióxido de
114 silício (SiO₂), segundo ensaio de fluorescência de raios - x realizado no laboratório de
115 Geoanalítica da USP.

116
117 Tabela 1 – Dimensões dos agregados utilizados nas misturas

Agregado	D _{máx}	Módulo de Finura
Areia fina natural quartzosa	0,60 mm	2,98
Areia média natural quartzosa	4,75 mm	4,17
Brita basáltica	19,00 mm	8,95
Pedrisco basáltico	9,50 mm	7,68
RLS britado	12,70 mm	4,94
RLS moído	Diâmetro médio das partículas 15,4µm	

118

119 Figura 1 – Resíduos de louça sanitária britado (esquerda) e moído (direita)



120

121 2.2 Dosagens de CAA

122 Foram preparadas nove dosagens de concreto, divididas em duas fases, conforme nomenclatura
123 da Figura 2. Partindo da dosagem de referência CAA_REF (0% de RLS), inicialmente foram
124 feitas substituições em volume de 20, 40, 60 e 80% da areia fina por RLS moído, estas misturas
125 foram denominadas de CAA_20, CAA_40, CAA_60 e CAA_80, respectivamente. Foram
126 mantidas as proporções de todos os demais componentes das misturas. Vale destacar que o RLS
127 moído é muito mais fino que o agregado miúdo (areia fina), o que pode contribuir para absorção
128 de água e em alterações na trabalhabilidade das misturas.

129
130 Figura 2 – Nomenclatura das dosagens de CAA

CAA_1

CAA_1_2

1 Porcentagem de RLS (Fino)
0% (REF); 20%; 40%; 60%; 80%

2 Porcentagem de RLS (Pedrisco)
20%; 40%; 60%; 80%

131
132 Num segundo momento, utilizou-se uma dosagem que atendesse aos critérios para concreto
133 autoadensável, segundo recomendação da norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017) e que contivesse
134 a maior quantidade de resíduos. A dosagem CAA_80 foi responsável pelo maior índice de
135 agregado fino de RLS. No entanto, no estado fresco, não alcançou o limite mínimo para
136 espalhamento e não alcançou os limites mínimos para habilidade passante exigidos pela norma
137 NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Assim, foi adotado a dosagem CAA_40 (40% de agregado fino
138 de RLS) como referência para realização das substituições de pedrisco por RLS britado, fixando
139 o consumo dos demais componentes. Partindo da mistura CAA_40, foram realizadas
140 substituições em volume de 20, 40, 60 e 80% de RLS por pedrisco, estas misturas foram
141 nominadas de CAA_40_20, CAA_40_40, CAA_40_60 e CAA_40_80 respectivamente. O
142 quantitativo dos materiais por metro cúbico de concreto autoadensável foi disposto na Tabela 2.
143 Para cada uma das dosagens foram moldados 8 corpos de prova cilíndricos (100 mm x 200
144 mm). Os corpos de prova foram mantidos em processo de cura por imersão em água por 28
145 dias, quando foram removidos para realização do ensaio de determinação da resistência à
146 compressão axial. A determinação resistência à compressão axial dos CAA(s) seguiu o
147 procedimento estabelecido na norma NBR 5739 (ABNT, 2018).

148
149 Tabela 2 – Quantitativo de materiais por metro cúbico de concreto das dosagens analisadas

Dosagem	Cimento Portland (kg/m ³)	Agregado Fino		Areia Média (kg/m ³)	Pedrisco		Brita (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)
		Areia (kg/m ³)	RLS (kg/m ³)		Rocha (kg/m ³)	RLS (kg/m ³)			
CAA_REF	436	281,22	0	624,79	546,74	0	234,13	239,364	3,488
CAA_20	436	224,98	58,77	624,79	546,74	0	234,13	239,364	3,488
CAA_40	436	168,73	117,53	624,79	546,74	0	234,13	239,364	3,488
CAA_60	436	112,49	176,3	624,79	546,74	0	234,13	239,364	3,488
CAA_80	436	56,24	235,06	624,79	546,74	0	234,13	239,364	3,488

CAA_40_20	436	168,73	117,53	624,79	437,4	86,38	234,13	239,364	3,488
CAA_40_40	436	168,73	117,53	624,79	328,05	172,76	234,13	239,364	3,488
CAA_40_60	436	168,73	117,53	624,79	218,7	259,14	234,13	239,364	3,488
CAA_40_80	436	168,73	117,53	624,79	109,35	345,52	234,13	239,364	3,488

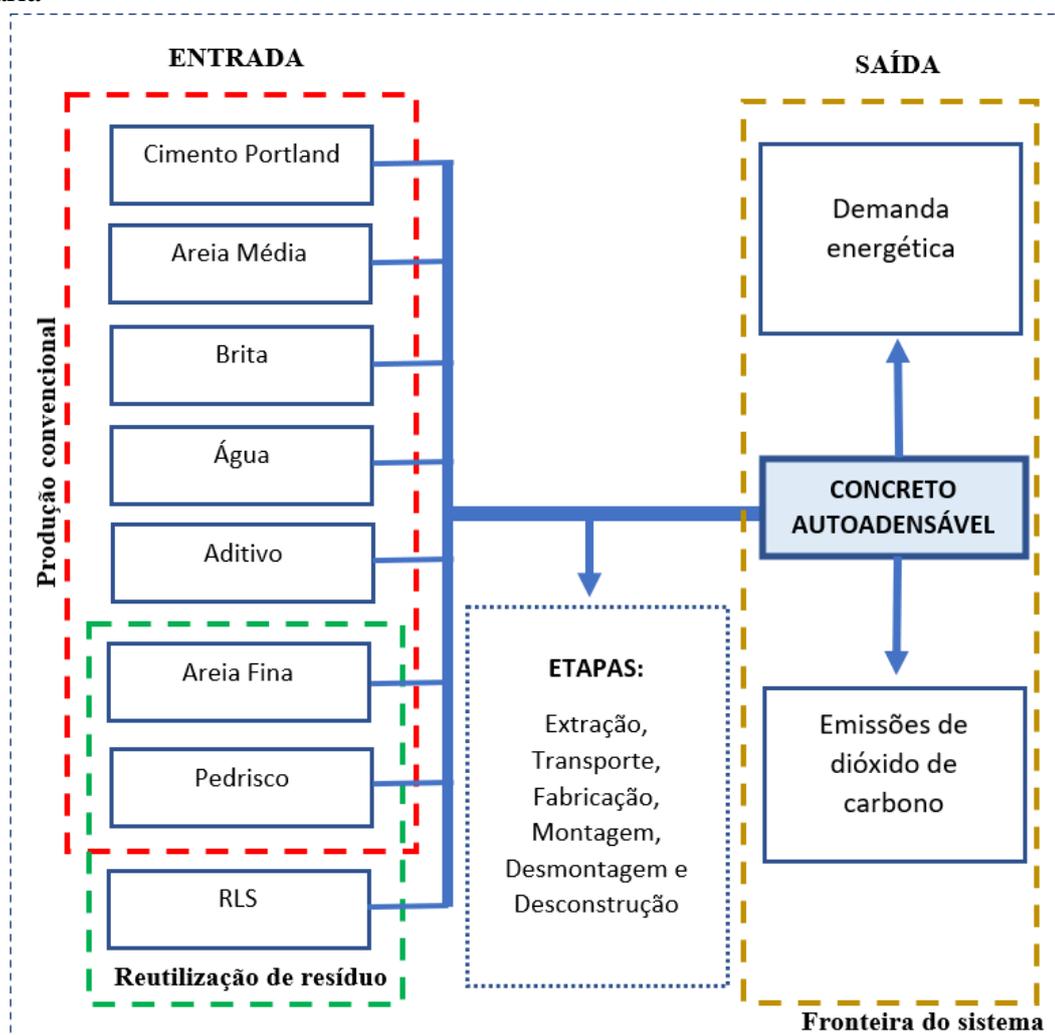
150 2.3 Avaliação ambiental das dosagens

151 O método de ACV proposto se baseia nas recomendações das normas NBR ISO 14040 (ABNT
152 2014) e NBR ISO 14044 (ABNT 2014). Para alcançar os objetivos propostos, adotou-se a
153 seguinte estrutura, conforme proposto pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2014):

- 154 • Definição do objetivo e escopo;
- 155 • Análise do inventário das emissões de carbono e energia;
- 156 • Avaliação de impacto no ciclo de vida das dosagens propostas;
- 157 • Interpretação, análise e discussão dos resultados da ACV.

158 A função objeto de investigação é produzir concretos autoadensáveis com resíduo de louça
159 sanitária. Para esse fim, adotou-se como unidade funcional uma unidade de volume de concreto
160 autoadensável no Sistema Internacional de Unidades (1 m³), considerando a disposição e
161 fronteiras do sistema (Figura 3).

162
163 Figura 3 – Fronteira do sistema de produção de concreto autoadensável com resíduo de louça
164 sanitária



166 Foi realizado ACVE e ACVCO₂ do berço ao portal (*grade-to-gate*), considerando as fases de
 167 extração, transporte, fabricação, montagem, desmontagem e desconstrução, para o ciclo de vida
 168 da produção das dosagens dos concretos autoadensáveis, análogo à concepção de Mithun e
 169 Narasimhan (2016), Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016), De Souza, Magalhães e Campos
 170 (2021) e De Souza *et al.* (2022).
 171 Na análise global do impacto ambiental das dosagens não foram considerados o impacto
 172 ambiental da produção do resíduo de louça sanitária, procedimento metodológico adotado por
 173 Mithun e Narasimhan (2016) e Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016) em pesquisas similares
 174 com incorporação de escórias de cobre e de aço, respectivamente. Avaliou-se o impacto
 175 ambiental individual dos componentes cimento *Portland* CP-V – ARI, areia fina, areia média,
 176 pedrisco, brita, água e aditivo redutor de água MC-TechniFlow 520 de cada uma das dosagens
 177 propostas, tal como realizado por Zeitz, Griffin e Dusicka (2019), León-Velez e Guillén-Mena
 178 (2020) e Brunetta *et al.* (2021). Para esse fim, foi estabelecido um inventário principal das
 179 emissões de carbono e energia incorporada, com o intuito de realizar a ACVE e a ACVCO₂,
 180 dos componentes das dosagens de CAA, conforme dados das Tabela 3. O inventário foi
 181 preparado com base nas pesquisas de Hammond e Jones (2011), Mithun e Narasimhan (2016),
 182 Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016), Paz (2020), De Souza, Magalhães e Campos (2021)
 183 e De Souza *et al.* (2022). Para efeito de discussão, foram quantificados separadamente os
 184 impactos ambientais dos agregados reciclados de RLS, conforme inventário proposto por Paz
 185 (2020), dados Tabela 3.

186
187

Tabela 3 – Inventário principal das emissões de carbono e energia incorporada

Componente	Emissões de CO ₂ (kg de CO ₂ eq./kg)	Energia Incorporada (MJ/kg)	Literatura
Cimento Portland	0,93	4,80	[2], [3], [4] e [5]
Areia Fina e Média	0,0051	0,0810	[1], [2], [3], [4] e [5]
Pedrisco e Brita	0,0048	0,0830	[1], [2], [3], [4] e [5]
Água	0,0008	0,2000	[2], [3] e [4] e [5]
Aditivo Redutor de Água	0,60	11,50	[2] e [3]
Agregado Fino de RLS	0,00131	0,00077	[6]
Pedrisco de RLS	0,00129	0,00075	[6]

188 Legenda: [1] Hammond e Jones (2011), [2] Mithun e Narasimhan (2016), [3] Palankar, Ravi
 189 Shankar e Mithun (2016), [4] De Souza, Magalhães e Campos (2021), [5] De Souza *et al.* (2022)
 190 e [6] Paz (2020).

191 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

192 Na Tabela 4, são apresentadas as classificações dos concretos de acordo com os ensaios
 193 realizados no estado fresco, conforme critérios da norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017). Destaca-
 194 se que o concreto CAA_80 não atingiu o limite mínimo para espalhamento e os concretos
 195 CAA_60 e CAA_80 não atingiram os limites mínimos para habilidade passante exigidos pela
 196 norma NBR 15823-1 (ABNT, 2017) para serem considerados como concretos autoadensáveis.
 197 Esse comportamento das dosagens CAA_60 e CAA_80 pode ser devido ao alto teor de material

198
199
200
201

fino de RLS em substituição ao agregado fino (areia), contribuindo para aumento da superfície específica e correspondente absorção de água.

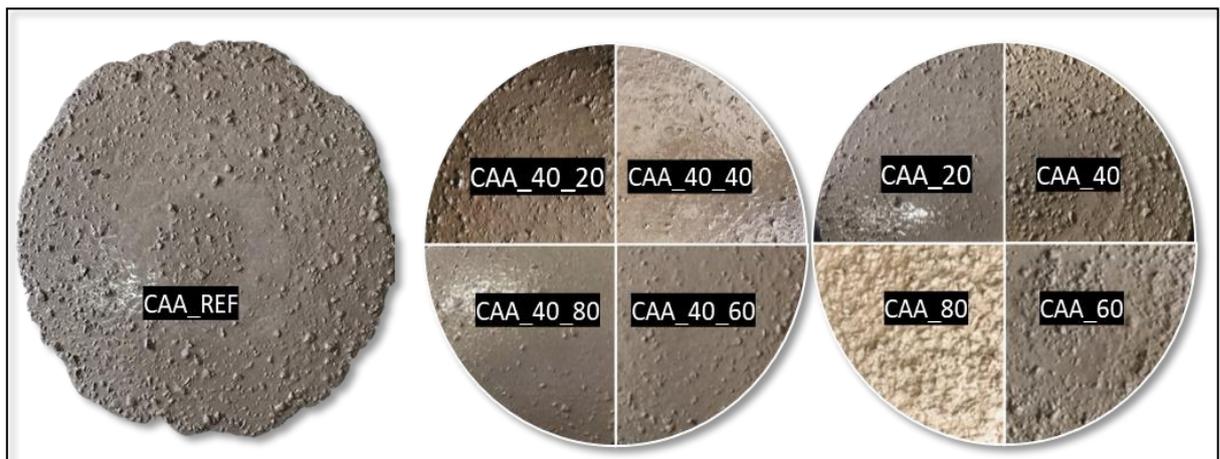
Tabela 4 – Classificação dos concretos no estado fresco

Dosagem	Espalhamento	IEV	Viscosidade plástica	Viscosidade plástica	Habilidade passante	
					NBR 15823-2 (ABNT, 2017)	NBR 15823-3 (ABNT, 2017)
CAA_REF	SF 2	I	VS 1	VF 2	PJ 1	PL 1
CAA_20	SF 2	I	VS 1	VF 1	PJ	PL 1
CAA_40	SF 2	I	VS 1	VF 2	PJ 1	PL 1
CAA_60	SF 1	I	VS 1	VF 1	Não atingiu	Não atingiu
CAA_80	Não atingiu	0	VS1	VF2	Não atingiu	Não atingiu
CAA_40_20	SF 3	I	VS 1	VF 1	PJ 1	PL 1
CAA_40_40	SF 3	I	VS 1	VF 2	PJ 1	PL 1
CAA_40_60	SF 3	I	VS 1	VF 2	PJ 1	PL 1
CAA_40_80	SF 3	I	VS 1	VF 2	PJ2	PL 1

202
203
204
205
206
207
208
209

Entretanto, estas misturas, assim como todas as demais apresentam características para utilização em elementos estruturais em ambientes com grau de agressividade III, conforme preconiza a norma NBR 12655 (ABNT, 2015). A Figura 4 mostra o aspecto físico dos CAA(s) no estado fresco, com as diferenças de consistência e aspectos pertinentes à presença de RLS em relação ao valor de referência (CAA_REF).

Figura 4 – Aspectos dos concretos autoadensáveis no estado fresco



210
211
212
213
214
215

Com o objetivo de analisar a atividade ambiental das dosagens, foi quantificado o aporte energético (Tabela 5) e as emissões de dióxido de carbono (Tabela 6) das misturas propostas. Constatou-se que a dosagem com maior impacto no custo energético também é responsável pelo maior quantitativo de emissões de dióxido de carbono.

216 Tabela 5 – Atividade ambiental do aporte energético das dosagens

Dosagem	Energia Incorporada (MJ)							Total (MJ/m ³)
	Cimento <i>Portland</i>	Areia Fina	Areia Média	Pedrisco	Brita	Aditivo redutor de água	Água	
CAA_REF	2092,80	22,78	50,61	45,38	19,43	40,11	47,87	2318,98
CAA_20	2092,80	18,22	50,61	45,38	19,43	40,11	47,87	2314,43
CAA_40	2092,80	13,67	50,61	45,38	19,43	40,11	47,87	2309,87
CAA_60	2092,80	9,11	50,61	45,38	19,43	40,11	47,87	2305,32
CAA_80	2092,80	4,56	50,61	45,38	19,43	40,11	47,87	2300,76
CAA_40_20	2092,80	13,67	50,61	36,30	19,43	40,11	47,87	2300,80
CAA_40_40	2092,80	13,67	50,61	27,23	19,43	40,11	47,87	2291,72
CAA_40_60	2092,80	13,67	50,61	18,15	19,43	40,11	47,87	2282,64
CAA_40_80	2092,80	13,67	50,61	9,08	19,43	40,11	47,87	2273,57

217

218 Tabela 6 – Atividade ambiental das emissões de dióxido de carbono das dosagens

Dosagem	Emissões de Dióxido de Carbono Equivalente (kg de CO ₂)							Total (kgCO ₂ /m ³)
	Cimento <i>Portland</i>	Areia Fina	Areia Média	Pedrisco	Brita	Aditivo redutor de água	Água	
CAA_REF	405,48	1,43	3,19	2,62	1,12	2,09	0,19	416,13
CAA_20	405,48	1,15	3,19	2,62	1,12	2,09	0,19	415,85
CAA_40	405,48	0,86	3,19	2,62	1,12	2,09	0,19	415,56
CAA_60	405,48	0,57	3,19	2,62	1,12	2,09	0,19	415,27
CAA_80	405,48	0,29	3,19	2,62	1,12	2,09	0,19	414,99
CAA_40_20	405,48	0,86	3,19	2,10	1,12	2,09	0,19	415,03
CAA_40_40	405,48	0,86	3,19	1,57	1,12	2,09	0,19	414,51
CAA_40_60	405,48	0,86	3,19	1,05	1,12	2,09	0,19	413,98
CAA_40_80	405,48	0,86	3,19	0,52	1,12	2,09	0,19	413,46

219

220 A dosagem CAA_REF, sem a incorporação de RLS, apresentou maiores impactos ambientais
221 na demanda energética e nas emissões de dióxido de carbono. Desta forma, infere-se que o uso
222 de RLS pode ser uma alternativa promissora para redução dos impactos ambientais em
223 concretos autoadensáveis. Além do benefício da reutilização dos RLS, a substituição de
224 agregados de RLS em CAA_REF, na dosagem CAA_40_80, gerou uma redução absoluta de
225 aproximadamente 45,42 MJ/m³ e 2,67 kg de CO₂/m³, equivalente respectivamente, a 2,2% e
226 0,6% dos valores médios dos impactos ambientais associados. Informação endossada por

227 Alsalman *et al.* (2021), ao mencionar os efeitos mínimos dos agregados, da cura do concreto e
 228 dos aditivos na energia e nas emissões de CO₂.
 229 Para efeitos de discussão, quantificou-se os impactos ambientais dos agregados de RLS,
 230 conforme Paz (2020), Tabela 7. Para além das vantagens de uma reutilização adequada do RLS,
 231 a quantificação do impacto ambiental (energia e emissões de CO₂) do RLS é irrisória face aos
 232 resultados observados (Tabela 7).
 233

234 Tabela 7 – Indicadores ambientais dos agregados de RLS

Dosagem	Energia Incorporada (MJ)		Total (MJ/m ³)	Emissões de Dióxido de Carbono Equivalente (kg de CO ₂)		Total (kgCO ₂ /m ³)
	Agregado Fino de RLS	Pedrisco de RLS		Agregado Fino de RLS	Pedrisco de RLS	
CAA_REF	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CAA_20	0,05	0,00	0,05	0,08	0,00	0,08
CAA_40	0,09	0,00	0,09	0,15	0,00	0,15
CAA_60	0,14	0,00	0,14	0,23	0,00	0,23
CAA_80	0,18	0,00	0,18	0,31	0,00	0,31
CAA_40_20	0,09	0,06	0,16	0,15	0,11	0,27
CAA_40_40	0,09	0,13	0,22	0,15	0,22	0,38
CAA_40_60	0,09	0,19	0,28	0,15	0,33	0,49
CAA_40_80	0,09	0,26	0,35	0,15	0,45	0,60

235

236 3.1 Evidências e implicações

237 Diante dos resultados de ACVE e ACVCO₂, as misturas com incorporação de RLS
 238 demonstraram potencial para atuar como alternativa ecologicamente ambiental para reutilização
 239 desses resíduos. Verificou-se que o uso de RLS em CAA, pode contribuir para a
 240 sustentabilidade ambiental, diminuindo a disposição inadequada desses RLS no meio ambiente
 241 e implementado um incremento de vida útil para estes resíduos, denominados de refugos
 242 queimados, cacos, ou ainda *pitcher*, que correspondem em torno de 6 a 20% do total de peças
 243 produzidas (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2010).

244 Identificou-se por meio da relação entre energia incorporada e as correspondentes emissões de
 245 dióxido de carbono, que as dosagens propostas apresentam uma demanda energética média de
 246 5,54 MJ por kg de CO₂ emitido, com uma abrangência de 5,50 (mínimo) a 5,57 (máximo) MJ
 247 por kg de CO₂.

248 De maneira geral, a adição de RLS em CAA mostrou ser uma boa alternativa na produção de
 249 concretos com resistência mecânica à compressão satisfatórias, informação confirmada por
 250 Almeida *et al.* (2019). As misturas CAA_REF, CAA_20, CAA_40, CAA_60 e CAA_80
 251 apresentaram resistência à compressão axial superiores à 30 MPa aos 28 dias. Em quanto as
 252 misturas CAA_40_20, CAA_40_40, CAA_40_60 e CAA_40_80 apresentaram resistências à
 253 compressão axial superiores à 25 MPa aos 28 dias, conforme dados dos eixos das abscissas da
 254 Figura 5 (a) e (b).

255 Ainda, neste estudo de incorporação de RLS em CAA, observou-se que a eficiência ambiental
 256 (EA), pode ser avaliada por meio da relação entre o parâmetro ambiental (energia e/ou emissões

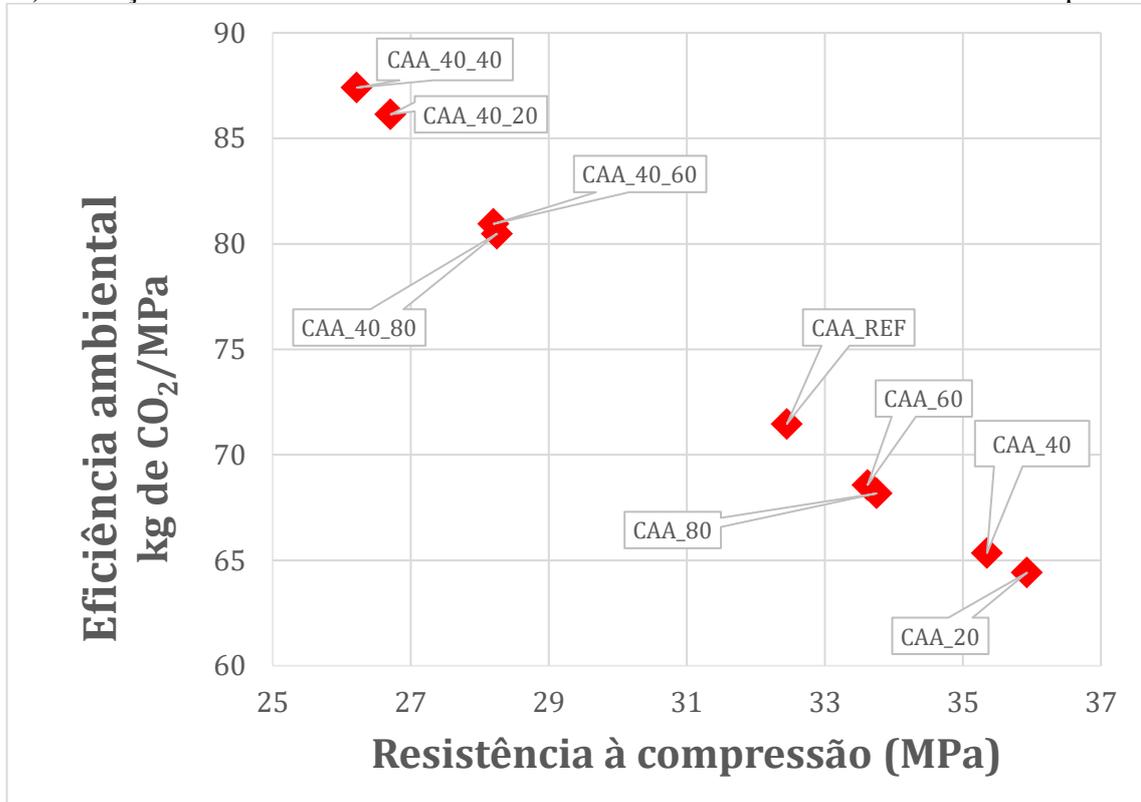
257 de dióxido de carbono) e a resistência mecânica à compressão (Equação 1), procedimento
258 adotado por Alsalman *et al.* (2021).

259

260 Figura 5 – Comportamento ambiental da incorporação de RLS em CAA

261

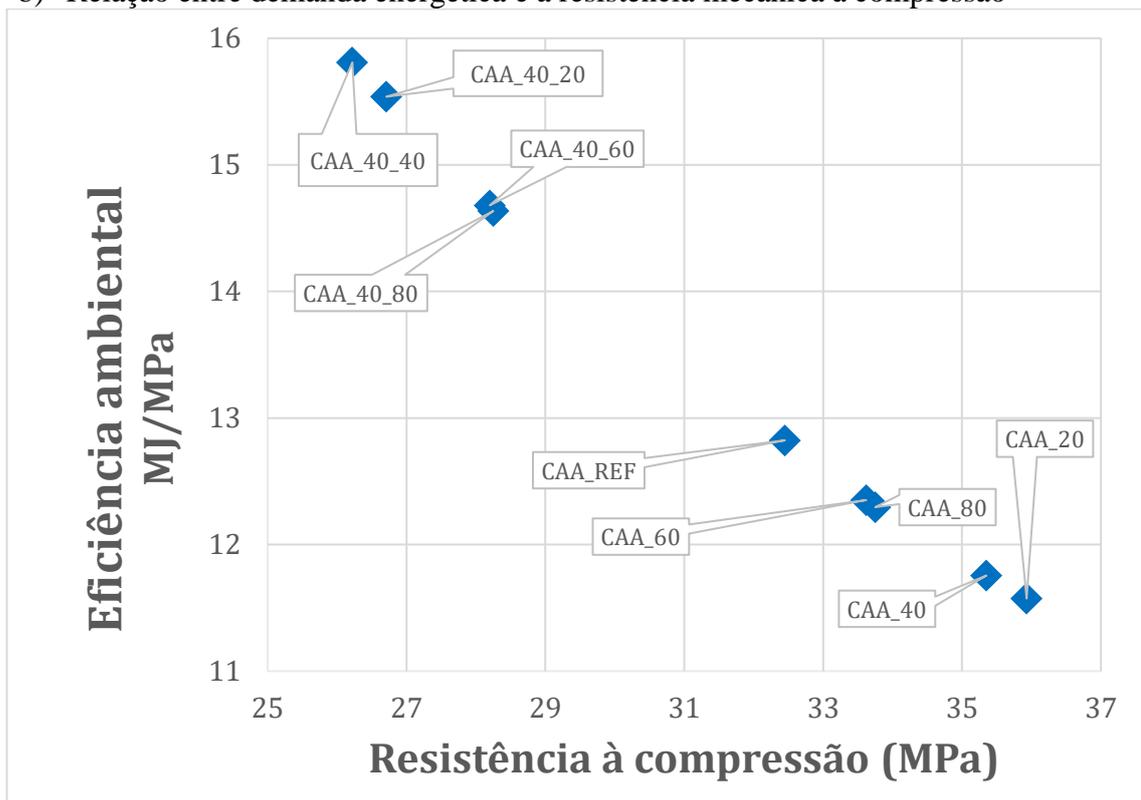
a) Relação entre emissões de dióxido de carbono e a resistência mecânica à compressão



262

263

b) Relação entre demanda energética e a resistência mecânica à compressão



264

265
$$EA = \frac{\text{Parâmetro ambiental}}{\text{Resistência mecânica à compressão}} \quad \text{Eq. 1}$$

266 Em que:

267 EA é a eficiência ambiental em MJ/MPa ou kg de CO₂/MPa em relação às propriedades

268 mecânicas de resistência à compressão;

269 Resistência mecânica à compressão em MPa;

270 Parâmetro ambiental pode ser o impacto energético ou as emissões de CO₂, MJ ou kg de CO₂,

271 respectivamente.

272

273 A eficiência ambiental proposta, representa quanto de impacto ambiental corresponde a uma

274 unidade de resistência mecânica à compressão. Neste sentido, quanto maior o valor numérico

275 de EA, maior é o impacto ambiental associado. Dessa forma, a dosagem CAA_20 pode ser

276 considerada, dentre as opções, a solução ecologicamente mais eficiente, apresentando uma

277 redução no impacto ambiental de cerca de 26% em relação a dosagem CAA_40_40 e de

278 aproximadamente 18% em relação à dosagem de referência (CAA_REF).

279 Desse modo, a Figura 5 (a), também representa o decréscimo linear das emissões de CO₂

280 que ocorreram com o aumento dos valores de resistência mecânica axial à compressão (MPa).

281 O mesmo comportamento foi verificado com relação ao impacto ambiental da demanda

282 energética (Figura 5 (b)). Expondo indicadores de uma significativa interferência das

283 propriedades mecânicas na energia incorporada e nas emissões de dióxido de carbono em

284 CAA(s).

285 Ressalta-se que o quantitativo dos materiais incorporados nas misturas, pode afetar de forma

286 substancial a demanda energética e as emissões de CO₂ de concretos, assim como observado

287 por Alsalman *et al.* (2021). Um melhoramento do desempenho ambiental pode ser alcançado

288 escolhendo dosagens de forma adequada, podendo chegar a uma redução do custo energético

289 da ordem de aproximadamente 25% em concretos convencionais, conforme relatado por De

290 Souza, Magalhães e Campos (2021). No cenário das emissões de CO₂, esse valor pode ser ainda

291 maior, chegando a uma atenuação de até 31,41%, segundo dados de Souza *et al.* (2022).

292 Verificou-se que o cimento é o material com maior impacto ambiental associado, informação

293 também relatada por Wang *et al.* (2017), sendo responsável por 91,0% da energia e 97,7% das

294 emissões de dióxido de carbono dos CAA. Para Alsalman *et al.* (2021), essas contribuições

295 podem ser menores, aproximadamente 80% da energia e 91% das emissões de CO₂. O uso de

296 concreto ativado por álcali, pode ser uma boa alternativa ao uso do concreto de cimento Portland

297 comum, pois pode apresentar benefícios eco sustentáveis ao meio ambiente (ALSALMAN *et*

298 *al.*, 2021). Os valores correspondentes da contribuição do cimento Portland, tendem a alcançar

299 uma maior compatibilidade quando se utiliza inventários semelhantes. Neste contexto, os dados

300 observados por De Souza *et al.* (2022), demonstraram que o cimento contribui com um valor

301 médio de 98,40% do total das emissões de CO₂. O que se deve provavelmente ao fato da

302 semelhança entre os processos metodológicos, em especial com relação à escolha do período

303 da fase de vida do produto e a compatibilidade dos dados do inventário de ACV.

304 Embora os resultados demonstrem a eficiência na reutilização adequada dos RLS e a

305 possibilidade de redução dos impactos ambientais de diferentes misturas de CAA, trabalhos

306 futuros podem explorar diferentes concentrações dos componentes empregados para avaliar

307 novas iterações e outros parâmetros ambientais.

308 Não obstante, é importante reforçar que neste estudo, não ocorreu uma relação direta entre a

309 dosagem com maior impacto ambiental e a eficiência da dosagem em relação à resistência

310 mecânica à compressão axial, o que pode estar ligado ao consumo de cimento que gera muitos

311 impactos ambientais, a presença de RLS e sua relação com a absorção de água, e com isso uma

312 alteração direta na resistência mecânica à compressão. Por exemplo, neste enquadramento a

313 dosagem CAA_40_80 apresentou menor demanda energética e menores emissões de CO₂. No

314 entanto, seu desempenho em relação a resistência à compressão emitiu mais gases e demandou
315 mais energia que a dosagem de referência (CAA_REF), conforme mostra a Figura 5. O que de
316 certa forma reforça a ideia de uma avaliação conjunto desses indicadores.
317 Nota-se, Figura 5, que as dosagens sem pedrisco de RLS (CAA_20, CAA_40, CAA_60 e
318 CAA_80), apresentaram melhores resultados com relação a eficiência ambiental, o que se deve
319 provavelmente à incorporação do pedrisco de RLS nas dosagens CAA_40_20, CAA_40_40,
320 CAA_40_60 e CAA_40_80. Embora as dosagens mantenham uma mesma relação água-
321 cimento, a incorporação de pedrisco de RLS contribuíram para uma considerável redução da
322 resistência mecânica à compressão. Por outro lado, a presença de uma substituição de 20% de
323 agregado fino (areia) por RLS (fino), apresentou-se de forma mais eficiente, favorecendo ao
324 empacotamento da mistura e um melhor desempenho mecânico. No entanto, ao elevar a
325 porcentagem desse material fino de RLS, a eficiência ambiental foi reduzida na medida que
326 ocorreram adições de RLS.

327 4 CONCLUSÕES

328 Buscou-se avaliar a reutilização de resíduo de louça sanitária (RLS) em substituição aos
329 agregados finos e pedriscos, na produção de concretos autoadensáveis (CAA), considerando os
330 impactos das Avaliações do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e das Emissões de CO₂
331 (ACVCO₂), destacam-se as seguintes conclusões.

332 A incorporação do RLS no CAA provou ser uma solução viável que facilita o reuso benéfico
333 do RLS e minimiza o descarte inadequado desses resíduos. Por outro lado, os resultados
334 demonstrados pela reutilização de RLS mostram que a substituição de agregados naturais por
335 RLS pode reduzir ligeiramente o impacto ambiental da mistura (energia e emissões de CO₂),
336 principalmente devido ao papel de destaque do cimento no impacto ambiental de concretos.

337 Infere-se que o uso de um indicador de eficiência do comportamento ambiental, por meio da
338 relação entre o parâmetro ambiental (energia e/ou emissões de dióxido de carbono) e a
339 resistência mecânica à compressão, pode ser empregado como uma ferramenta auxiliar na
340 tomada de decisões em projetos sustentáveis de dosagens para CAA. A combinação de
341 procedimentos convencionais de tecnologia de dosagens de CAA com a abordagem de
342 eficiência ambiental, é capaz de facilitar o entendimento que cada componente da mistura
343 exerce nos impactos ambientais e sua relação com o comportamento resistente à compressão.

344 Ainda, neste estudo, constatou-se que não existe uma proporção direta entre os indicadores de
345 impacto ambiental (energia e emissões de CO₂) e a eficiência ambiental em relação a resistência
346 mecânica à compressão, o que reforça ainda mais a ideia de uma avaliação conjunta desses
347 indicadores em projetos de dosagens. Conclui-se ainda que uma substituição parcial adequada
348 de RLS em CAA pode gerar uma redução do impacto ambiental associado ao parâmetro
349 resistência mecânica à compressão axial em aproximadamente 26% em comparação com outras
350 misturas propostas e em 18% em relação à dosagem de referência.

351 REFERÊNCIAS

352 ALMEIDA, D. H. DE *et al.* Properties of concrete manufactured with use of ceramic sanitary
353 ware waste as aggregate. **Matéria**, v. 24, n. 2, 10 jun. 2019.

354 ALSALMAN, A. *et al.* Energy and CO₂ emission assessments of alkali-activated concrete
355 and Ordinary Portland Cement concrete: A comparative analysis of different grades of
356 concrete. **Cleaner Environmental Systems**, v. 3, p. 100047, 1 dez. 2021.

357 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11768-1**: Aditivos
358 químicos para concreto de cimento Portland: Requisitos. Rio de Janeiro, 2019.

- 359** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de
360 cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro,
361 2015.
- 362** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-1**: Concreto
363 autoadensável: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017.
- 364** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-2**: Concreto
365 autoadensável: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de
366 estabilidade visual - Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017.
- 367** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-3**: Concreto
368 autoadensável: Determinação da habilidade passante - Método do anel J. Rio de Janeiro,
369 2017.
- 370** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-4**: Concreto
371 autoadensável: Determinação da habilidade passante - Métodos da caixa L e da caixa U. Rio
372 de Janeiro, 2017.
- 373** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823-5**: Concreto
374 autoadensável: Determinação da viscosidade - Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017.
- 375** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland -
376 Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- 377** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de
378 compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.
- 379** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão
380 Ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e Estrutura. Brasil. Rio de Janeiro, 2014.
- 381** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão
382 Ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2014.
- 383** ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA
384 REVESTIMENTOS – ANFACER. **Louças Sanitárias e Congêneres. Números do setor.**
385 Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>. Acesso em: 6
386 dez. de 2021.
- 387** BIBM *et al.* **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete**. 2005.
- 388** BRUNETTA, R. F. da S. *et al.* Life cycle energy assessment and carbon dioxide emissions of
389 wall systems for rural houses. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 37–50, 13 nov. 2021.
- 390** CABRAL JUNIOR, M. *et al.* Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica
391 no Estado de São Paulo: Parte III – Indústrias de Colorifícios, Sanitários e Cerâmica Técnica -
392 Isoladores. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 3, p. 15–26, 27 set. 2019.
- 393** CABRAL JUNIOR, M. *et al.* Panorama da Indústria Cerâmica de Sanitários no Brasil.
394 **Cerâmica Industrial**, v. 15, p. 12-18, dez. 2010.
- 395** CHASTAS, P. *et al.* Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A
396 review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings. **Building and Environment**,
397 v. 130, p. 212–226, 15 fev. 2018.

- 398 DE SOUZA, R. M. *et al.* Modelo neuro-fuzzy para predição das emissões de CO₂ de
399 dosagens de concreto para biodigestores na suinocultura. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4,
400 p. 321–334, 2022.
- 401 DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; CAMPOS, A. T. Modelo neuro-fuzzy para
402 predição do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações. **Ambiente**
403 **Construído**, v. 21, n. 2, p. 295–309, 10 mar. 2021.
- 404 DE WOLF, C.; POMPONI, F.; MONCASTER, A. Measuring embodied carbon dioxide
405 equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. **Energy and**
406 **Buildings**, v. 140, p. 68–80, 1 abr. 2017.
- 407 GESOGLU, M. *et al.* Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes
408 containing different percentage of plastic waste powder. **Construction and Building**
409 **Materials**, v. 140, p. 562–569, 1 jun. 2017.
- 410 HAMMOND, G.; JONES, C. A. **Embodied carbon: the Inventory of Carbon and Energy**
411 **(ICE)** Edited by Fiona Lowrie and Peter Tse. Bracknell: BSRIA, 2011.
- 412 HUANG, P. J.; HUANG, S. L.; MARCOTULLIO, P. J. Relationships between CO₂
413 emissions and embodied energy in building construction: A historical analysis of Taipei.
414 **Building and Environment**, v. 155, p. 360–375, 15 maio 2019.
- 415 KOENDERS, E. A. B.; PEPE, M.; MARTINELLI, E. Compressive strength and hydration
416 processes of concrete with recycled aggregates. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p.
417 203–212, 1 fev. 2014.
- 418 LEÓN-VELEZ, A.; GUILLÉN-MENA, V. Energía contenida y emisiones de CO₂ en el
419 proceso de fabricación del cemento en Ecuador. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 611–
420 625, 3 jul. 2020.
- 421 MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e**
422 **Materiais**. 2ª ed, São Paulo: IBRACON, 2014, 749 p.
- 423 MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. Performance of alkali activated slag concrete
424 mixes incorporating copper slag as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p.
425 837–844, 20 jan. 2016.
- 426 PALANKAR, N.; RAVI SHANKAR, A. U.; MITHUN, B. M. Durability studies on eco-
427 friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. **Journal of Cleaner**
428 **Production**, v. 129, p. 437–448, 15 ago. 2016.
- 429 SHARMA, R.; KHAN, R. A. Influence of copper slag and metakaolin on the durability of self
430 compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 1171–1186, 10 jan. 2018.
- 431 SHOAEI, P. *et al.* Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated
432 slag mortar: A comprehensive comparative study. **Construction and Building Materials**, v.
433 251, p. 118991, 10 ago. 2020.
- 434 SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Incorporation of high-volume fly ash waste and high-volume
435 recycled alumina waste in the production of self-consolidating concrete. **Journal of Cleaner**
436 **Production**, v. 159, p. 194–206, 15 ago. 2017.
- 437 TENNICH, M.; KALLEL, A.; BEN OUEZDOU, M. Incorporation of fillers from marble and
438 tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and Building**
439 **Materials**, v. 91, p. 65–70, 30 ago. 2015.
- 440 WANG, J. *et al.* Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures.
441 **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 80, p. 1162–1174, 2017.

442 ZEITZ, A.; GRIFFIN, C. T.; DUSICKA, P. Comparing the embodied carbon and energy of a
443 mass timber structure system to typical steel and concrete alternatives for parking garages.
444 **Energy and Buildings**, v. 199, p. 126–133, 15 set. 2019.

445 PAZ, C. F. **Inventário do ciclo de vida aplicado à produção de agregados a partir de**
446 **resíduos de construção e demolição**. Medianeira - PR, 2020. 117 f. Dissertação (Mestrado
447 em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira - PR,
448 2020.

449 **AGRADECIMENTOS**

450 Será inserido na versão final, após aprovação do artigo para publicação.

ARTIGO IV: AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE DIFERENTES DOSAGENS DE CONCRETOS PARA UMA HABITAÇÃO RURAL

Este artigo está formatado de acordo com as normas da "Energia na Agricultura". É uma versão submetida ao conselho editorial do periódico.

Avaliação do ciclo de vida de diferentes dosagens de concretos para uma habitação rural

Life cycle assessment of different concrete mixes in rural housing

Resumo

Habitações rurais desempenham um importante papel na vida de agricultores familiares, trabalhadores e comunidades rurais, tornando indispensável a avaliação da sustentabilidade ambiental durante o ciclo de vida dos materiais de construção. Este trabalho apresenta a avaliação do ciclo de vida dos materiais empregados na produção de diferentes misturas de concreto (cimento Portland; agregado graúdo; agregado miúdo e água). Para esse fim, foi utilizada a metodologia proposta pela NBR ISO 14040 nas avaliações do ciclo de vida da energia (ACVE) e das emissões de dióxido de carbono (ACVCO₂) dentre o universo das distintas dosagens experimentais. Os resultados indicam que a escolha adequada da dosagem deve levar em consideração além das propriedades físicas e mecânicas, o quantitativo dos componentes e suas relações com os impactos ambientais no ciclo de vida. Dessa forma, servindo como estratégia inovadora para o projeto de habitações ecologicamente mais sustentáveis.

Palavras-chave: Emissões de dióxido de carbono. Concreto sustentável. Construções rurais. Energia incorporada. Consumo de energia.

Abstract

Rural housing plays an important role in the lives of family farmers, workers and rural communities, making it essential to assess environmental sustainability during the life cycle of building materials. This work presents the evaluation of the life cycle of materials used in the production of different concrete mixes (Portland cement; coarse aggregate; sand and water). For this purpose, the methodology proposed by NBR ISO 14040 was used in assessments of the energy life cycle (LCEA) and the carbon dioxide emissions life cycle (LCCO₂A) among the universe of different experimental dosages. The results indicate that the proper choice of dosage must take into account, in addition to the physical and mechanical properties, the quantity of components and their relationship with the environmental impacts in the life cycle. Thus, serving like serving as an innovative strategy for designing more ecologically sustainable housing.

Keywords: Carbon dioxide emissions. Sustainable concrete. Rural buildings. Embodied energy. Energy consumption.

1 INTRODUÇÃO

As habitações rurais muitas das vezes podem ter sua importância diminuída em diferentes aspectos. Conseqüentemente, pouca atenção é dedicada ao estudo da sustentabilidade de construções rurais. Cabeza et al. (2014) afirmaram que a maioria dos estudos é realizada em áreas urbanas, enquanto as áreas rurais não estão bem representadas na literatura.

Para Estokova e Porhincak (2015), a seleção dos materiais de construção é um fator importante que influencia não apenas na funcionalidade futura da construção, mas também no desempenho ambiental. O concreto é o principal material de construção no mundo (De Souza, Magalhães, De Andrade 2019). Santoro e Kripka (2016), relataram que o uso difundido do concreto advém da grande facilidade de execução e adaptação às mais diversas formas.

Para Tulevech et al. (2018), o concreto é de longe o componente de construção responsável pelos maiores impactos ambientais em massa. Para Tuladhar e Yin (2019), a energia incorporada pode ser utilizada para avaliar a sustentabilidade dos materiais de construção civil. De acordo com De Souza, Magalhães e Campos (2021), o concreto pode ter sua sustentabilidade ambiental avaliada por meio da energia incorporada (embutida). No entanto, para Chastas et al. (2018), a avaliação das emissões de CO₂ também é uma importante ferramenta na avaliação da sustentabilidade ambiental de construções em concreto. Atualmente, Asdrubali et al. (2020), afirmaram que a maioria dos países desenvolvidos estão lutando para reduzir as emissões de carbono na atmosfera para cumprir os acordos internacionais.

De acordo com Huang, Huang e Marcotullio (2019), quanto mais energia acumulada na fabricação do material de construção, mais CO₂ está associado ao processo de construção. Mithun e Narasimhan (2016) ratificaram a importância do parâmetro ambiental energia e das emissões de CO₂ para o desempenho ambiental de concretos. Para Cabeza et al. (2014), esses indicadores são amplamente utilizados na avaliação de construções.

De Wolf, Pomponi e Moncaster (2017) relataram que embora exista uma relação entre o consumo energético e as emissões de dióxido de carbono (CO₂), eles não são diretamente equivalentes, o que reforça a necessidade de estudo combinado destes parâmetros. De Souza, Magalhães e Campos (2021) demonstraram a importância de estudar o quantitativo dos materiais empregados em diferentes dosagens de concreto. Shoaie et al.

(2020) afirmaram que o quantitativo dos componentes empregados no concreto pode influenciar na emissão de CO₂ e na demanda de energia.

Assim, as demandas de energia e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) são de grande importância para as construções em concreto e podem ser mensurados pela Avaliação do Ciclo de Vida Energético (ACVE) e pela Avaliação do Ciclo de Vida das Emissões de CO₂ (ACVCO₂), seguindo-se os procedimentos padronizados da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), apresentados pelas normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). Medeiros, Durante e Callejas (2018) comprovaram que a ACV é uma metodologia apropriada para avaliação ambiental quantitativa de materiais e sistemas construtivos.

Neste contexto, este trabalho propõe o uso de ACVE e ACVCO₂ como ferramenta para Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de diferentes misturas de concreto de uma habitação rural. Buscou-se avaliar o campo das dosagens de concreto sob à luz da ACV, considerando os impactos de cada componente no fluxo de energia e nas emissões de CO₂, o que possibilitou mensurar a sustentabilidade do quantitativo dos componentes empregados em diferentes possibilidades de concretos para uma habitação rural, apontando opções ambientalmente menos impactantes. Desse modo, essa pesquisa apresenta notável contribuição para o avanço científico relacionado a ACV de diferentes dosagens de concreto para habitações rurais, proposta promissora paraecoinovação no projeto de construções rurais, com potencial para ser adotada como referência em novas pesquisas sobre sustentabilidade em ambiente construído.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Características da habitação rural

A arquitetura rural adotada neste trabalho (90,95 m², Figura 1) é similar à adotada por Brunetta et al. (2021), a qual segundo os autores consiste em um modelo de construção frequentemente utilizado em conjuntos habitacionais rurais do Programa Nacional de Habitação Rural – PNHR, no âmbito do Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV), por meio da Lei nº 12.424 (BRASIL, 2011), atual Programa Casa Verde e Amarela, instituído pela Lei nº 14.118 (BRASIL, 2021).

O projeto da habitação rural foi modelado no software Revit (Figura 1), pelos Engenheiros Civis Ailton Alexandre Silva Junior (CREA MG nº 239.028) e Jonas Guilherme de Oliveira (CREA MG nº 245.438), construção com uma área total de 90,95 m², em sistema estrutural de concreto armado, vedação em alvenaria de blocos cerâmicos não

estruturais, revestimento interno e externo das paredes com argamassa cimentícia, pé-direito de 3,0 m, piso de cimento queimado devido ao bom desempenho na resistência ao desgaste, área de topografia plana com solo de características favoráveis para implantação da habitação rural.

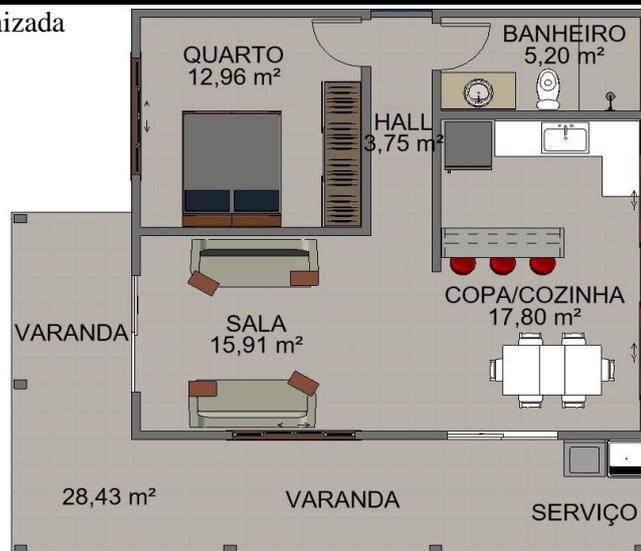
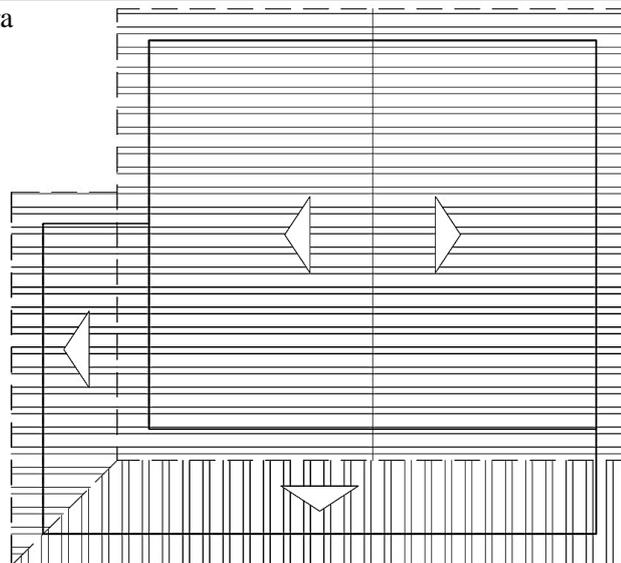
Para a avaliação do volume estimado de concreto necessário, foram considerados os elementos vigas, pilares, fundações rasas (viga baldrame e sapatas), lajes maciças, paredes com aberturas reforçadas por vergas e contravergas, e dez por cento de perdas diversas, que podem ocorrer na etapa da construção, procedimento também adotado por De Souza, Magalhães e Campos (2021). Resultando em uma habitação rural que consome um volume aproximado de 34 m³ de concreto convencional.

O material em estudo é o concreto convencional, produto da mistura de um aglomerante (cimento Portland), com agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e água. Nesta pesquisa, para avaliação das diferentes possibilidades de dosagens, utilizaram-se dados de corpos de prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, preparados no município de Pouso Alegre, Minas Gerais (Brasil), com água proveniente da rede de abastecimento público, agregados miúdos e graúdos caracterizados de acordo com as normas NBR NM 27 (ABNT, 2001), NBR NM 45 (ABNT, 2006), NBR NM 52 (ABNT, 2009c) e NBR NM 53 (ABNT, 2009d), e cimento Portland do tipo CP II E, classificado e padronizado pela norma brasileira NBR 16697 (ABNT, 2018). Agregado miúdo com massa específica unitária média de 1.600,7 kg/m³, e massa específica aparente de 2.107,1 kg/m³. Agregado graúdo com massa específica unitária média de 1.526,9 kg/m³, e massa específica aparente de 2.673,5 kg/m³.

Foi utilizado um processo parcialmente industrializado de produção do concreto, com uso de mão de obra e máquina simples (betoneira estacionária), por ser o mais sustentável de acordo com o controle de qualidade emergia, realizado por Reynosa-Morales et al. (2017).

Todos os corpos de provas foram moldados em condições ambientais semelhantes, com adensamento manual com 2 camadas e 12 golpes por camada, utilizando processo de cura por imersão em água, conforme estabelecido na norma NBR 5738 (ABNT, 2015b).

Os dados de trabalhabilidade das amostras foram obtidos por meio do ensaio de abatimento de troco cone conforme NBR NM 67 (ABNT, 1998), a resistência mecânica à compressão dos corpos de prova capeados com Neoprene foi obtida após 28 dias de cu-

Figura 1 – Projeto gráfico da habitação rural (sem escala).**a)** Perspectiva externa do modelo renderizado**b)** Planta baixa humanizada**c)** Diagrama de cobertura

Fonte: Elaborado pelos autores.

ra por imersão em água, por ensaio de compressão axial utilizando máquina universal eletrônica digital com capacidade 100 t (hidráulica I-3058, da marca Pavitest), procedimentos regulamentados pela norma NBR 5739 (ABNT, 2015c).

Para uma representatividade do campo das dosagens, diferentes dosagens foram propostas, com materiais medidos em unidade de massa para dosagem de uma unidade funcional de volume (1 m³ de concreto), condições para preparo de concreto conforme norma NBR 12655 (ABNT, 2015a). Ainda, cada um dos componentes constituintes das dosagens foi selecionado de forma a manter a trabalhabilidade e a resistência mecânica à compressão dentro de limites compatíveis com o comportamento de concretos convencionais (Tabela 1), o domínio desses componentes no campo quantitativo das dosagens foi semelhante ao proposto por De Souza, Magalhães e Campos (2021).

As diferentes propostas de dosagens, foram avaliadas com relação as emissões equivalentes de CO₂ incorporado e o aporte de energia no ciclo de vida. Optou-se ainda, por separar os diferentes cenários de dosagens em intervalos de resistência mecânica (compressão), avaliando desta forma as dosagens preponderantes em cada uma das faixas representadas nas Figuras 3, 4, 5, 6 e 7, procedimento similar ao definido por De Souza, Magalhães e Campos (2021).

Tabela 1 – Domínio dos componentes das dosagens propostas.

Cimento Portland (kg/m³)	Água (kg/m³)	Agregado graúdo (kg/m³)	Agregado miúdo (kg/m³)
[384,62 – 597,84]	[158,89 – 270,00]	[800,14 – 1146,60]	[198,10 – 734,20]

Fonte: Elaborado pelos autores.

2.1 Avaliação do ciclo de vida das dosagens de concreto

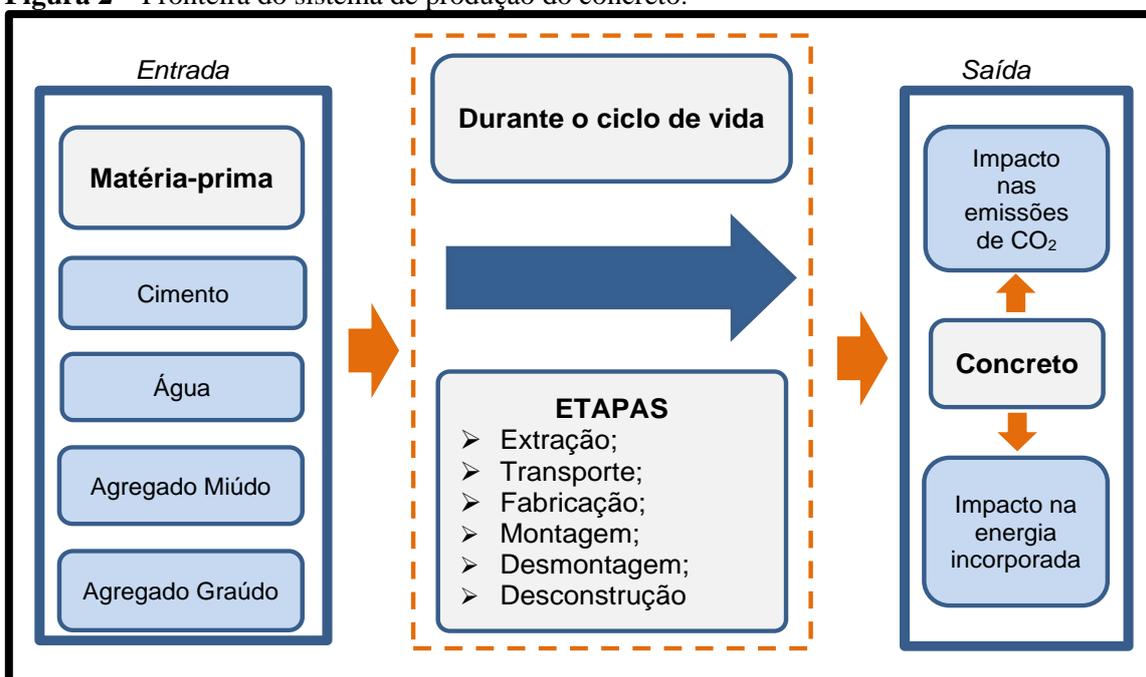
Para alcançar os objetivos propostos, foi adotada a seguinte estruturação, conforme proposto pela norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a):

- Definição do objetivo e escopo;
- Análise do inventário das emissões de carbono e energia embutida;
- Avaliação de impacto no ciclo de vida das diferentes propostas de concreto;
- Interpretação do impacto ambiental na implantação de uma habitação rural e discussão dos resultados da ACV.

A função objeto de estudo é produzir concretos convencionais para uma habitação rural. A Figura 2 representa a fronteira do sistema considerado. A unidade funcional, base

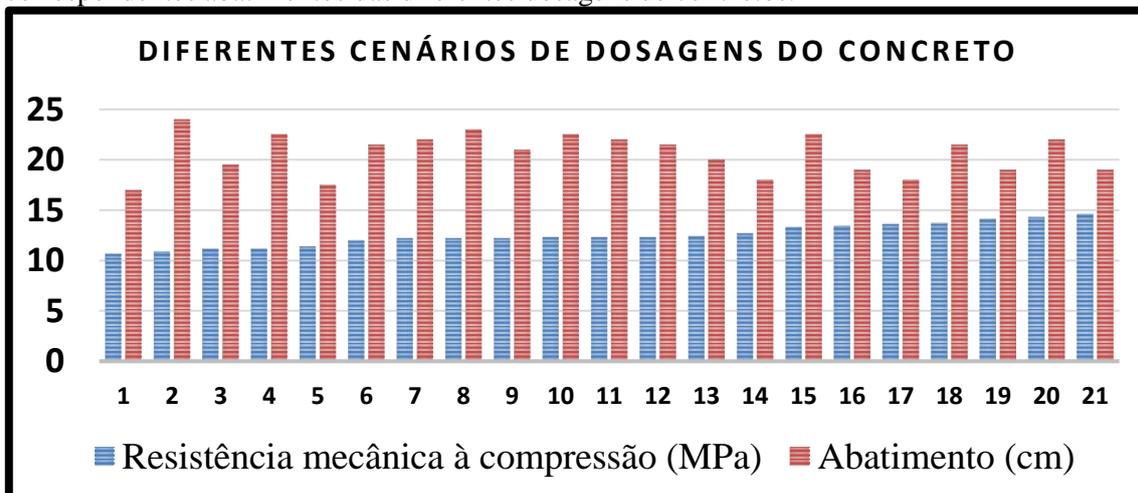
para comparação adotado neste trabalho é uma unidade de volume de concreto produzido no Sistema Internacional de Unidades (1 m^3 de concreto), para uma amostragem composta por 96 dosagens experimentais (diferentes faixas de resistência), conforme representado nas Figuras 3, 4, 5, 6 e 7. Para realização da ACVE e da ACVCO₂, em uma abordagem do berço ao portão (*grade-to-gate*), foram consideradas as etapas de extração da matéria-prima, transporte, fabricação, montagem, desmontagem e desconstrução, durante o ciclo de vida de produção das distintas dosagens de concreto, conforme proposto por Mithun e Narasimhan (2016) e Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016).

Figura 2 – Fronteira do sistema de produção do concreto.



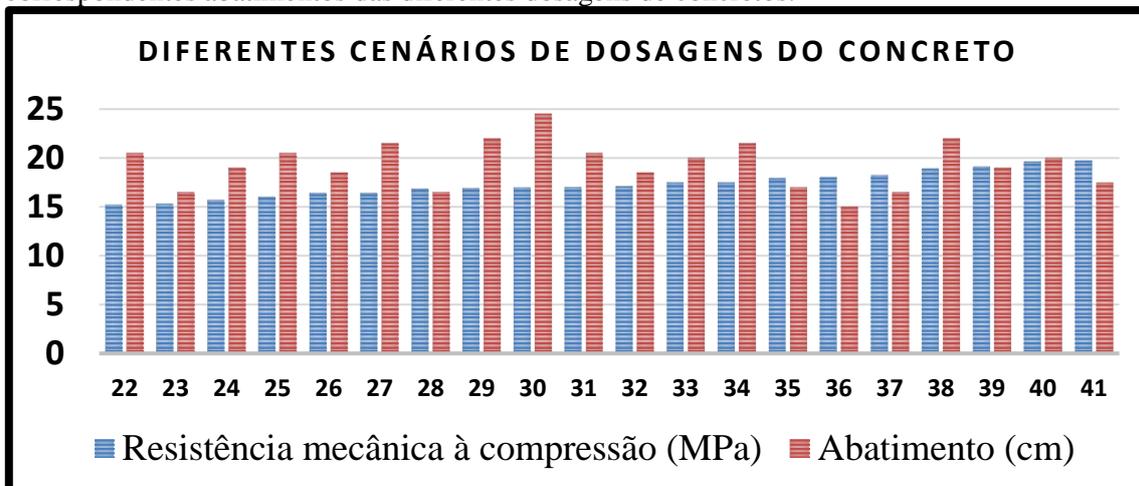
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 3 – Relação entre resistências mecânicas à compressão (faixa de 10 MPa a 15 MPa) e os correspondentes abatimentos das diferentes dosagens de concretos.



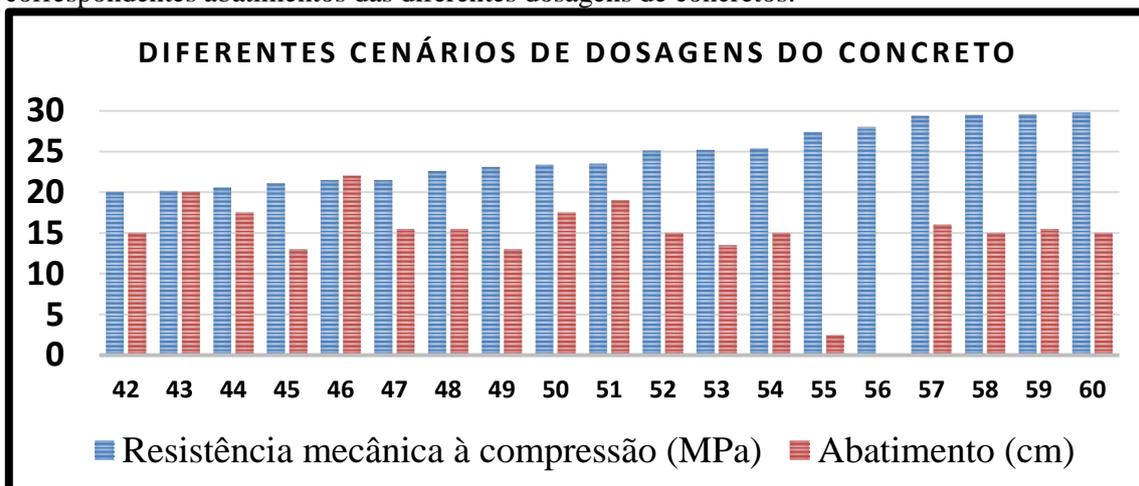
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 4 – Relação entre resistências mecânicas à compressão (faixa de 15 MPa a 20 MPa) e os correspondentes abatimentos das diferentes dosagens de concretos.



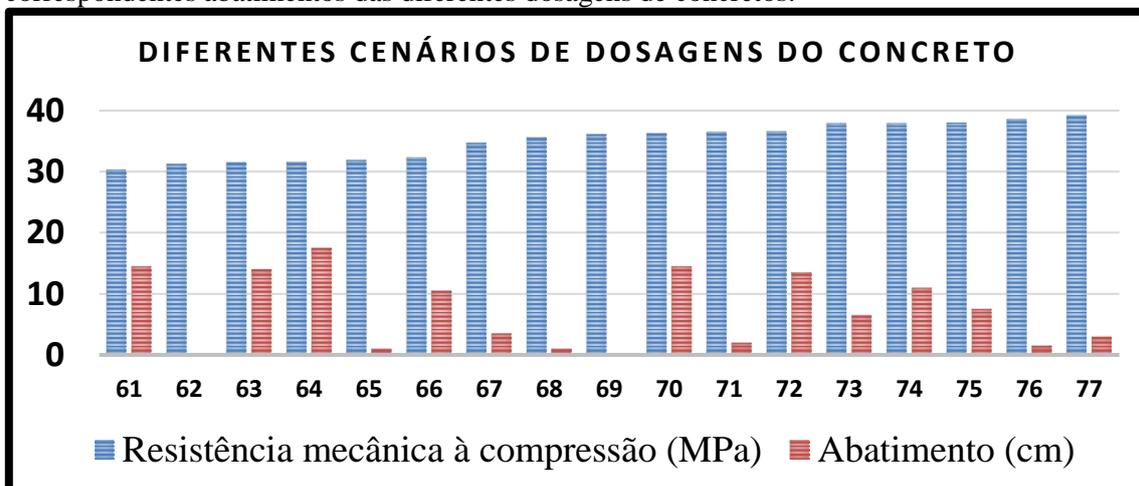
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 5 – Relação entre resistências mecânicas à compressão (faixa de 20 MPa a 30 MPa) e os correspondentes abatimentos das diferentes dosagens de concretos.



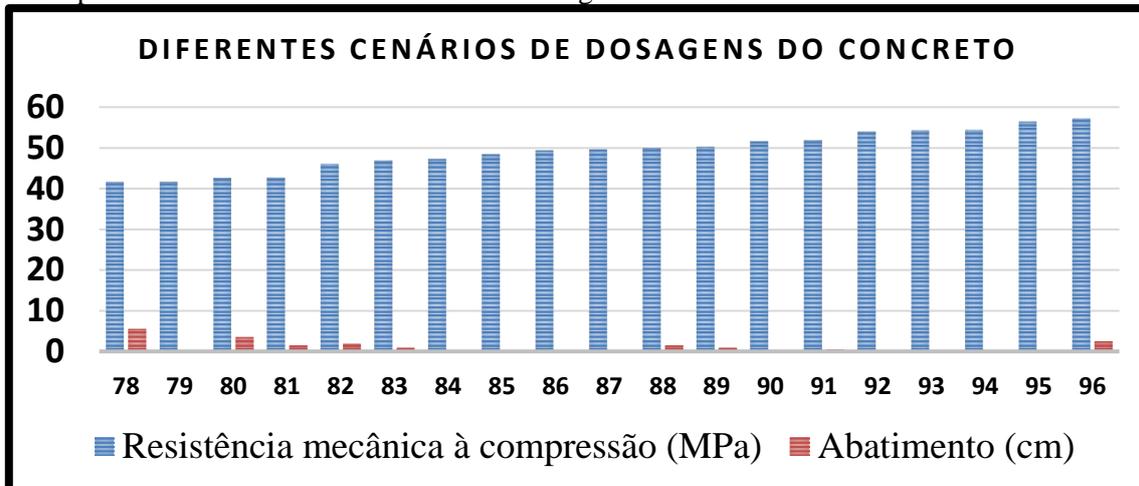
Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 6 – Relação entre resistências mecânicas à compressão (faixa de 30 MPa a 40 MPa) e os correspondentes abatimentos das diferentes dosagens de concretos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 7 – Relação entre resistências mecânicas à compressão (faixa superior a 40 MPa) e os correspondentes abatimentos das diferentes dosagens de concretos.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Procedimentos da ACV realizados de acordo com as normas NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a) e NBR ISO 14044 (ABNT, 2009b). Considerou-se as contribuições individuais de cada um dos componentes (cimento Portland, agregado graúdo, agregado miúdo e água), procedimento metodológico semelhante ao adotado por Borges et al. (2014), Mithun e Narasimhan (2016), Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016), Mattioli et al. (2018), Medeiros, Durante e Callejas (2018), Zeitz, Griffin e Dusicka (2019), León-Velez e Guillén-Mena (2020), Brunetta et al. (2021) e De Souza, Magalhães e Campos (2021).

Tabela 2 dispõe os dados de inventário empregado na ACVE e ACVCO₂, dados também adotados por Mithun e Narasimhan (2016), Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016), De Souza, Magalhães e Campos (2021) e De Souza et al. (2022), semelhante ao proposto por Hammond e Jones (2011), na publicação intitulada “*The Inventory of Carbon and Energy (ICE)*”, literatura essa amplamente utilizado em pesquisas científicas sobre impactos incorporados na construção civil.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Avaliação do ciclo de vida dos componentes das dosagens

Com base nos procedimentos metodológicos adotado nesta pesquisa, verificou-se que o componente cimento Portland apresenta maior percentagem de contribuição para o impacto na ACVE, sendo o material responsável por um valor médio de 93,43% do total de energia das dosagens. Este material, com tal característica é responsável ainda pela maior percentagem de emissão equivalente de dióxido de carbono, indicador de aquecimento global, medido por meio da ACVCO₂, com valor médio de 98,41%.

Assim, o cimento Portland é o responsável pelo maior impacto na sustentabilidade ambiental das dosagens, informação confirmada por Wang et al. (2017) e De Souza, Magalhães e Campos (2021). De modo igual, Barboza, Storch e Almeida Filho (2020), apresentaram dados sobre concretos autoadensáveis que corroboram com os resultados desta pesquisa, sustentaram ainda que é viável a produção de concretos autoadensáveis com um quantitativo menor de cimento Portland, garantindo a qualidade de suas propriedades mecânicas.

Tabela 2 – Inventário principal das emissões de carbono e energia incorporada.

Material	Emissões de CO₂ (kg de CO ₂ Eq./kg)	Energia (MJ/kg)	Fonte
Cimento Portland	0,9300	4,800	[1]; [2]; [3] e [4]
Agregado graúdo	0,0048	0,083	[1]; [2]; [3] e [4]
Agregado miúdo	0,0051	0,081	[1]; [2]; [3] e [4]
Água	0,0008	0,200	[1]; [2]; [3] e [4]

Legenda: [1] Mithun e Narasimhan (2016); [2] Palankar, Ravi Shankar e Mithun (2016); [3] De Souza, Magalhães e Campos (2021); [4] De Souza *et al.* (2022).

Fonte: Elaborado pelos autores.

As contribuições percentuais de cada um dos componentes (cimento Portland, água, agregado graúdo e agregado miúdo) para o impacto global no consumo de energia e nas emissões de dióxido de carbono, estão apresentadas nas Tabelas 3 e 4, respectivamente. Distante do percentual de colaborado do cimento Portland, observou-se que o agregado graúdo ocupa a segunda posição de destaque, com um valor médio de 3,26% do aporte de energia e 1,03% das emissões equivalente de carbono, das dosagens em estudo. Os valores médios das contribuições nas emissões equivalentes de carbono e demanda de energia agregada, de cada um dos componentes das dosagens de concreto, estão indicados na Figura 8.

Perante o exposto, é notório que o quantitativo dos componentes tem fundamental importância para a sustentabilidade ambiental das dosagens de concretos, informação confirmada por De Souza, Magalhães e Campos (2021). Verificou-se ainda que essa escolha da dosagem adequada deve ser fundamentada em uma ampla busca, considerando trabalhabilidade, resistência mecânica (compressão), energia incorporada e emissões de dióxido de carbono. Todavia, em função da resistência mecânica à compressão, os

concretos podem ter suas aplicações limitadas ao uso não estrutural, conforme regulamenta a norma NBR 8953 (ABNT, 2015d). Contudo, para um uso estrutural, a escolha deve ser fundamentada nas recomendações normativas da NBR 6118 (ABNT, 2014), em função das diferentes classes de agressividade do ambiente.

Tabela 3 – Contribuição percentual de cada componente para o impacto no aporte de energia.

Cimento Portland (%)	Água (%)	Agregado graúdo (%)	Agregado miúdo (%)
[91,24 – 95,52]	[1,09 – 2,30]	[2,28 – 4,40]	[0,56 – 2,80]

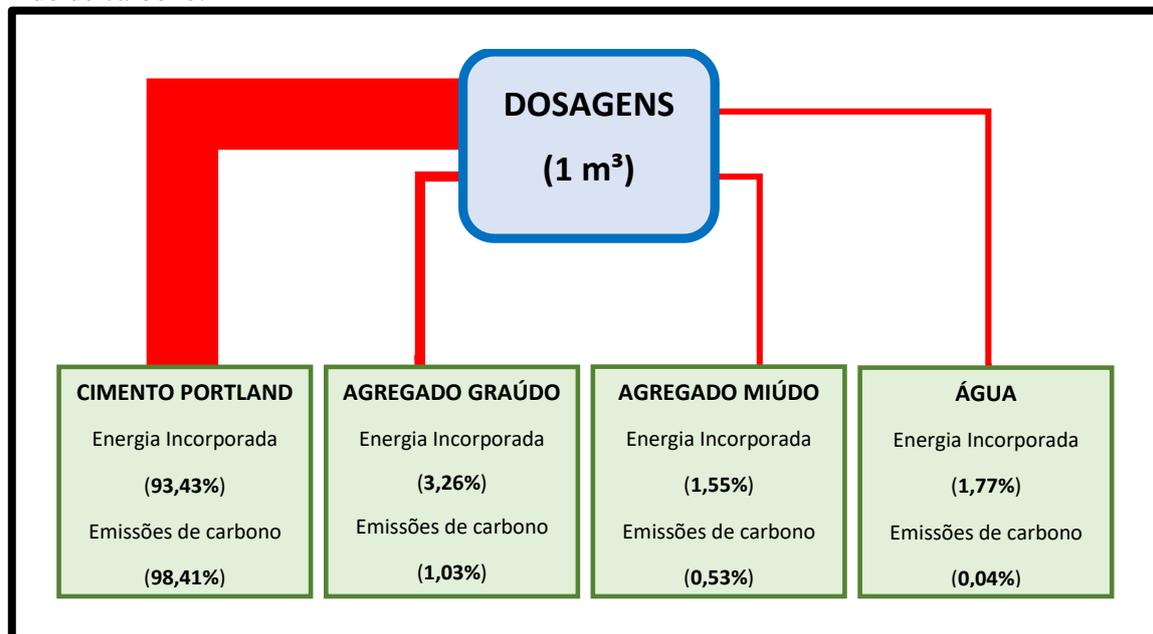
Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 4 – Contribuição percentual de cada componente para o impacto nas emissões equivalentes de dióxido de carbono.

Cimento Portland (%)	Água (%)	Agregado graúdo (%)	Agregado miúdo (%)
[97,79 – 98,98]	[0,02 – 0,05]	[0,71 – 1,40]	[0,19 – 0,97]

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 8 – Indicador de fluxo médio da demanda de energia e das emissões equivalentes de dióxido de carbono.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados da Tabela 5 revelaram que a dosagem ID-01 é responsável pelos maiores impactos na energia embutida e nas emissões de dióxido de carbono, mesmo apresentando um dos menores valores de resistência mecânica à compressão (11,17 MPa), para a amostragem das dosagens com valores de resistência mecânica à

compressão inferiores a 15 MPa, o que fortalece a necessidade de estudos sobre a tecnologia das dosagens de concreto. A dosagem ID-02 foi a responsável pelos menores impactos na energia incorporada e nas emissões de dióxido de carbono, considerando todo o banco de dados do experimento, com uma resistência mecânica à compressão de 12,00 MPa e dados da amostragem da Figura 3. Para o intervalo de 15 a 20 MPa, as dosagens ID-03 e ID-04, apontaram máximos e mínimos valores de energia e emissões de carbono, respectivamente.

Tabela 5 – Dosagens com maiores efeitos no desempenho ambiental.

Dosagem	Unidade funcional 1 m ³ de concreto				Ensaio experimentais		Impacto ambiental	
	Cimento Portland (kg/m ³)	Agregado Miúdo (kg/m ³)	Agregado Graúdo (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Abatimento <i>slump test</i> (mm)	Resistência mecânica à compressão (MPa)	Energia (MJ/m ³)	Emissões de carbono (kg de CO ₂ Eq. /m ³)
ID-01	495,00	250,00	850,00	260,00	225	11,17	2518,80	465,91
ID-02	384,62	322,60	1023,39	210,61	215	12,00	1999,37	364,42
ID-03	550,00	450,00	1010,00	270,00	215	16,40	2814,28	518,86
ID-04	395,05	600,20	1031,57	224,44	185	17,10	2075,36	375,59
ID-05	415,00	640,00	1085,00	165,00	0	28,00	2166,90	394,55
ID-06	595,00	480,00	1035,00	245,00	155	29,60	3029,79	560,96
ID-07	410,00	210,00	1070,00	160,00	0	31,27	2105,82	387,64
ID-08	597,84	420,10	863,20	235,46	145	36,30	3022,40	562,47
ID-09	405,66	734,20	965,89	182,68	15	38,60	2123,34	385,79
ID-10	430,31	443,30	878,76	178,16	55	41,60	2209,96	406,81
ID-11	427,70	722,50	801,49	188,58	15	42,70	2215,72	405,44
ID-12	583,27	626,40	812,87	185,70	0	54,30	2955,04	549,69

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os resultados também indicaram que a dosagem ID-05 é a responsável pelos menores impactos nas emissões de dióxido de carbono e no aporte de energia embutida, para uma faixa de resistência mecânica à compressão de 20 a 30 MPa. No entanto, nesta mesma faixa de 20 a 30 MPa, na dosagem ID-06 foi observado o maior valor de impacto ambiental em relação à energia incorporada de todo o universo de discurso, o mesmo não foi observado para emissões de dióxido de carbono, cuja dosagem de maior impacto ambiental foi a dosagem ID-08 (intervalo de resistência mecânica à compressão de 30 a 40

MPa), com maior contribuição para o aquecimento global, a dosagem ID-8 também foi responsável pelos maiores valores de energia para concretos com resistência mecânica entre 30 e 40 MPa. Neste intervalo de 30 a 40 MPa, a dosagem ID-07 indicou o menor valor para energia incorporada e a ID-09, os menores valores de emissões de dióxido de carbono neste intervalo. As dosagens ID-10 e ID-11, para misturas com resistência superior a 40 MPa, representam menor energia embutida e menores emissores de dióxido de carbono, respectivamente. Contudo, a dosagem ID-12 exibiu os maiores valores de energia e emissões de gás carbônico de efeito estufa.

Assim, verificou-se que existe uma relação entre as emissões equivalentes de CO₂ e a demanda de energia, conforme relatado por Huang, Huang e Marcotullio (2019). Nesta pesquisa, essa relação foi verificada para as dosagens com resistência mecânica inferior a 30 MPa, as dosagens com valores superiores apresentaram pequenas perturbações nos resultados, mostrando que podem existir distintas dosagens com relação ao desempenho ambiental sob a ótica da ACVE e da ACVCO₂, e que a escolha da dosagem adequada deve estar apoiada em diferentes aspectos fundamentais que possam contribuir para um desenvolvimento mais sustentável.

3.2 Avaliação do ciclo de vida do concreto da habitação rural

O concreto da habitação rural apresentou um custo energético de 67,9786 a 103,0127 GJ e emissões de carbono entre 12,3904 e 19,1238 kg de CO₂ Eq., o que corresponde a desvios tênues de 34,01% e 35,21%, respectivamente. Essa variação, também foi observada no fator de emissões de dióxido de carbono por energia, conforme representado na Tabela 6. Observou-se ainda um valor médio de fator de emissões de carbono por energia incorporada de 183,95 kg de CO₂ Eq. por GJ.

Com os resultados dessa pesquisa (Tabela 7), revelou-se que o custo energético do concreto por metro quadro de área construída, pode variar de 747,43 a 1132,63 MJ/m², o que corresponde a um desvio absoluto de 385,20 MJ/m², podendo ser uma das ferramentas de apoio para escolha de dosagens, contribuindo desta forma para um meio ambiente ecologicamente equilibrado, conforme prescreve o art. 225º da Constituição Federal (1988). Análogo, essas variações também estão presentes nas emissões de CO₂ Eq./m², com valores limites de 136,23 a 210,27 kg de CO₂ Eq./m², isso corresponde com os resultados de um estudo anterior realizado por Iqbal, Himmler e Gheewala (2018).

Os valores das fronteiras do aporte de energia e emissões de carbono, para diferentes faixas de resistência mecânica à compressão do concreto da habitação rural (Figura

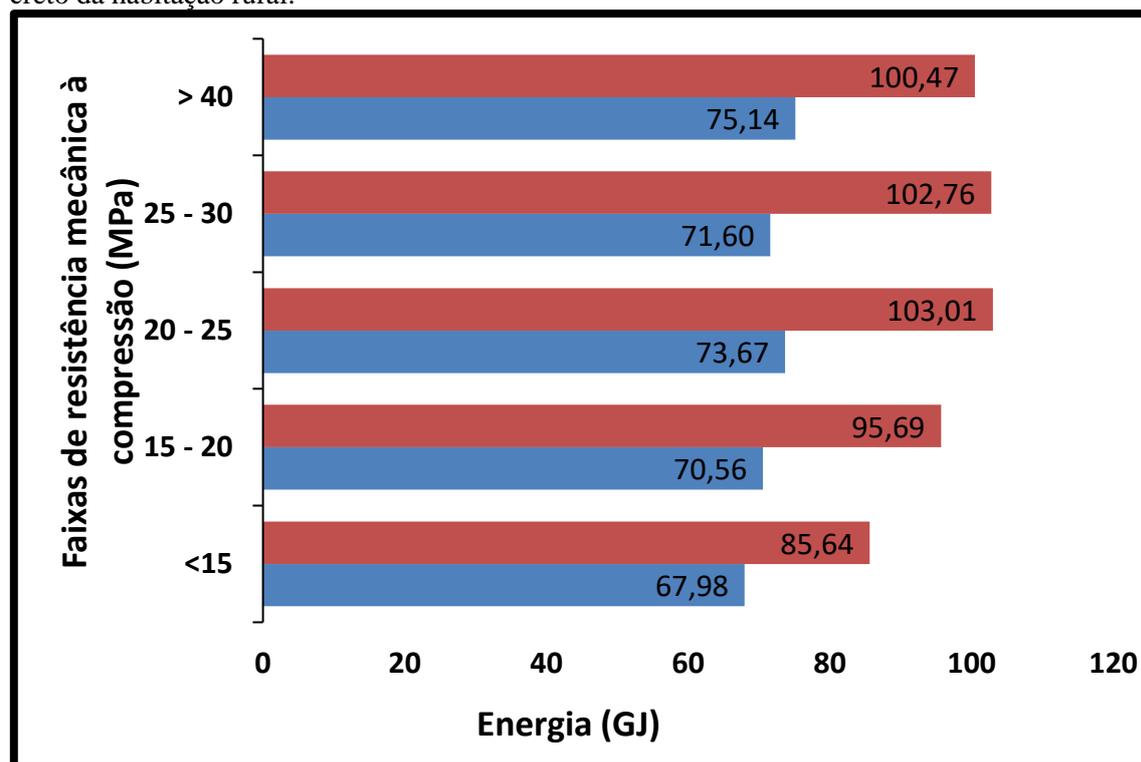
1) estão apresentados nas Figuras 9 e 10, respectivamente. De acordo com Santoro e Kripka (2016), as menores resistências características do concreto são responsáveis pelas menores emissões de carbono. No entanto, nesta pesquisa verificou-se que o quantitativo de cada componente, pode influenciar na energia investida nos materiais necessários para produção de concretos, o que sugere a existência de um universo de discurso difuso, in-formação também observada por De Souza, Magalhães e Campos (2021).

Tabela 6 – Desempenho ambiental do concreto da habitação rural.

Energia (GJ)	Emissões de carbono (Ton de CO ₂ Eq.)	Fator de emissões de dióxido de carbono (kg de CO ₂ Eq. /GJ)
[67,9786 – 103,0127]	[12,3904 – 19,1238]	[180,7751 – 187,0908]

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 9 – Valores limites da energia por faixa de resistência mecânica à compressão do concreto da habitação rural.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Ainda, como limitação do estudo, neste tipo de ACV, podem ocorrer incertezas quanto a sua aplicabilidade em território nacional, devido a inexistência de procedimentos metodológicos e dados de inventário desenvolvidos exclusivamente para a realidade brasileira local (MEDEIROS, DURANTE e CALLEJAS, 2018). Caldas e Toledo Filho (2019) sugerem que seja dada atenção especial a análise de incertezas e a busca por

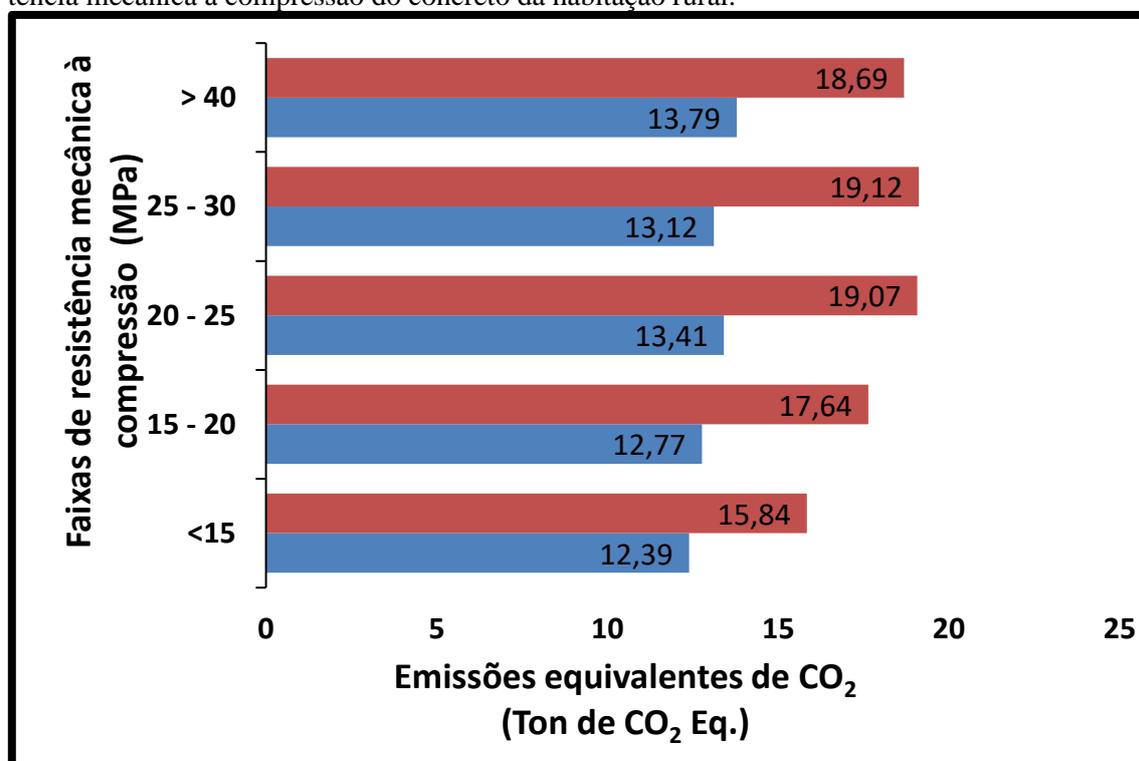
utilização de inventários locais para os componentes primários na produção de concretos. O que está diretamente ligado com a confiabilidade do estudo (Silva et al. 2018).

Tabela 7 – Custo energético e emissões equivalentes de CO₂ do concreto por m².

Extremos	Emissões de CO ₂	Energia
Mínimo	136,23 kg de CO ₂ Eq./m ²	747,43 MJ/m ²
Máximo	210,27 kg de CO ₂ Eq./m ²	1132,63 MJ/m ²

Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 10 – Valores limites das emissões equivalentes de dióxido de carbono por faixa de resistência mecânica à compressão do concreto da habitação rural.



Fonte: Elaborado pelos autores.

4 CONCLUSÕES

No presente trabalho investigou-se o desenvolvimento sustentável de uma habitação rural em concreto convencional. Os impactos ambientais da produção de concreto foram avaliados por meio da ACVE e ACVCO₂. As principais conclusões são as seguintes:

1 – Para implantação da habitação rural objeto de estudo, conclui-se que existe uma variação do consumo de energia incorporada do volume de diferentes possibilidades de concreto, essas alternativas apresentaram valores que variaram de 67,98 a 103,01 GJ, para resistências mecânicas à compressão de 10,67 a 57,10 MPa. Constatou-se ainda, que

também podem ocorrer diferenças significativas nas emissões de dióxido de carbono, em função da escolha da dosagem do concreto, com valores de 12,39 e 19,12 Toneladas de dióxido de carbono (Ton de CO₂ Eq.) para implantação da habitação rural. O que demonstrou valores médios de custo energético e das emissões de carbono, por metro quadrado construído, de 938,94 MJ/m² e 172,82 kg de CO₂ Eq., respectivamente.

2 – As análises do ciclo de vida energético e das emissões de carbono, das dosagens experimentais de concreto do presente estudo, indicaram que o cimento é o material com maior percentual de contribuição para o impacto ambiental, da ordem de 91,24 a 95,52% para o parâmetro energia incorporada e de 97,79 a 98,98% para as emissões de carbono. Contudo, o estudo indica que o quantitativo de cada um dos componentes pode influenciar na energia e nas emissões de carbono da dosagem ideal, o que sugere a possibilidade de um campo de estudo difuso.

3 – No geral, essa temática forneceu subsídios e indicativos promissores para a sustentabilidade do concreto de construções rurais, considerando propriedade física de trabalhabilidade, propriedade mecânica de resistência à compressão axial e os impactos ambientais no ciclo de vida dos componentes empregados em concretos, demonstrando a importância de uma avaliação conjunta desses indicadores e do quantitativo dos componentes para o desempenho ambiental de concretos convencionais. Sendo, portanto, uma proposta ecoinovadora para tecnologia das dosagens de concretos eficientes em relação ao aporte de energia e as emissões de dióxido de carbono.

REFERÊNCIAS

- ASDRUBALI, F., *et al.* Dynamic life cycle assessment modelling of a NZEB building. **Energy**, vol. 191, p. 116489, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421932184X>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, 2015a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos prova de concreto. Rio de Janeiro, 2015b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2015c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para

fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência, 2015d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**: Agregados – Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica unitária e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

BARBOZA, L. da S.; STORCH, I. S.; ALMEIDA FILHO, F. M. de. Concreto autoadensável ecoeficiente com baixo consumo de cimento. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 2, p. 59-71, 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/gn9R6rzNQzXDkw4yt5Txxtp/?lang=pt>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

BORGES, P. H. R., *et al.* Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, vol. 14, no 2, p. 153–68, 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/xVQkySsxyBRGR8BZZS4zYyq/abstract/?lang=pt>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

BRASIL. Lei nº 12.424, de 16 de junho de 2011. Altera a Lei nº 11.977, de 7 de julho de 2009, que dispõe sobre o Programa Minha Casa Minha Vida e a regularização fundiária de assentamentos localizados em áreas urbanas; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 17 jun. 2011. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2011/lei/112424.htm> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

BRASIL. Lei nº 14.118, de 12 de janeiro de 2021. Altera as Leis nºs 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.100, de 5 de dezembro de 1990, 8.677, de 13 de julho de 1993, 11.124, de 16 de junho de 2005, 11.977, de 7 de julho de 2009, 12.024, de 27 de agosto de 2009, 13.465, de 11 de julho de 2017, e 6.766, de 19 de dezembro de 1979; e revoga a Lei nº 13.439, de 27 de abril de 2017, que institui o Programa Casa Verde e Amarela. **Diário Oficial da União**, Brasília, 12 jan. 2021. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/Lei/L14118.htm> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

BRUNETTA, R. F. da S. *et al.* Life cycle energy assessment and carbon dioxide emissions of wall systems for rural houses. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 37-50, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/vCvcb8pQmwJ43ZhfT8nbJqj/?lang=en>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

CABEZA, L. F. *et al.* Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis

- (LCEA) of buildings and the building sector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 29, p. 394-416, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032113005777>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.
- CALDAS, L. R. e TOLEDO FILHO, R. D. Avaliação do Ciclo de Vida de materiais cimentícios utilizados no Brasil: estudo para o bloco de concreto e diferentes argamassas. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 2, n. 2, p. 34-61, 2019. Disponível em: <<http://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/4143>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.
- CHASTAS, P. *et al.* Normalising and assessing carbon emissions in the building sector: A review on the embodied CO₂ emissions of residential buildings. **Building and Environment**, v. 130, p. 212-226, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132317306005>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.
- DE SOUZA, R. M. *et al.* Modelo neuro-fuzzy para predição das emissões de CO₂ de dosagens de concreto para biodigestores na suinocultura. **Ambiente Construído**, v. 22, n. 4, p. 321-334, 2022.
- DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; CAMPOS, A. T. Modelo neuro-fuzzy para predição do aporte de energia de diferentes dosagens de concreto em edificações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 295-309, 2021. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/zngD6VVCwMwSrwBj3htbQKs/abstract/?lang=pt>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.
- DE SOUZA, R. M.; MAGALHÃES, R. R.; DE ANDRADE, E. T. Comparative study of non-linear simulations of a reinforced concrete slender column using finite element method and p-delta. **Theoretical and Applied Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2019. Disponível em: <<http://www.taaeufla.deg.ufla.br/index.php/TAAE/article/view/7>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.
- DE WOLF, C.; POMPONI, F.; MONCASTER, A. Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice. **Energy and Buildings**, v. 140, p. 68-80, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817302815>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.
- ESTOKOVA, A.; PORHINCAK, M. Environmental analysis of two building material alternatives in structures with the aim of sustainable construction. **Clean Technologies and Environmental Policy**, Springer Science and Business Media LLC, v. 17, n. 1, p. 75-83, 2015. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10098-014-0758-z>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.
- HAMMOND, G.; JONES, C. A. **A BSRIA guide. Embodied Carbon – The Inventory of Carbon and Energy (ICE)**. Bracknell: BSRIA, 2011.
- HUANG, P.-J. J.; HUANG, S.-L. L.; MARCOTULLIO, P. J. Relationships between CO₂ emissions and embodied energy in building construction: A historical analysis of Taipei. **Building and Environment**, Elsevier, v. 155, n. April, p. 360-375, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013231930229X>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.
- IQBAL, M. I.; HIMMLER, R.; GHEEWALA, S. H. Environmental impacts reduction potential through a PV based transition from typical to energy plus houses in Thailand: A life cycle perspective. **Sustainable Cities and Society**, vol. 37, p. 307-22, 2018. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221067071730820X>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

LEÓN-VELEZ, A.; GUILLÉN-MENA, V. Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 611-625, 2020. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/5grH7jKx-gRq48Fr9jdFLXYr/?lang=es>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

MATTIOLI, M. C. *et al.* Demanda energética na construção de galpão para frangos de corte modelo *Darkhouse*. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 33, n. 3, p. 216-223, 2018. Disponível em: <<https://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/arti-cle/view/2832>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

MEDEIROS, L. M.; DURANTE, L. C.; CALLEJAS, I. J. A. Contribuição para a avaliação de ciclo de vida na quantificação de impactos ambientais de sistemas construtivos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 365-385, 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/SKNpHgTr88Bhgw3HcHRD8jc/?lang=pt>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

MITHUN, B. M.; NARASIMHAN, M. C. Performance of alkali activated slag concrete mixes incorporating copper slag as fine aggregate. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 837-844, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652615007465>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

PALANKAR, N.; RAVI SHANKAR, A. U.; MITHUN, B. M. Durability studies on eco-friendly concrete mixes incorporating steel slag as coarse aggregates. **Journal of Cleaner Production**, vol. 129, p. 437-48, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616303006>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

REYNOSA-MORALES, L. M., *et al.* Sustainability evaluation of different techniques for concrete mixing based on quality control. **Revista ALCONPAT**, vol. 7, n. 1, p. 87-103, 2017. Disponível em: <<https://revistaalconpat.org/index.php/RA/article/view/175>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

SANTORO, J. F.; KRIPKA, M. Determinação das emissões de dióxido de carbono das matérias primas do concreto produzido na região norte do Rio Grande do Sul. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 35-49, 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/ac/a/SvtDDYjsv4tpPgpsQbZn6zR/?lang=pt>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

SENADO FEDERAL. **Constituição Federal de 1988**. Brasília, DF, 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

SHOAEI, P. *et al.* Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated slag mortar: A comprehensive comparative study. **Construction and Building Materials**, vol. 251, p. 118991, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006182030996X>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

SILVA, F. B. *et al.* Relevance of including capital goods in the life cycle assessment of construction products. **LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida**, v. 2, n. 2, p. 7-22, 2018. Disponível em: <<http://lalca.acv.ibict.br/lalca/article/view/4350>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

TULADHAR, R.; YIN, S. Sustainability of using recycled plastic fiber in concrete. Use of recycled plastics in eco-efficient concrete, **Woodhead Publishing Series in Civil**

and Structural Engineering, p. 441–460, jun. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780081026762000219>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

TULEVECH, S. M. *et al.* Life cycle assessment: a multi-scenario case study of a low-energy industrial building in Thailand. **Energy and Buildings**, Elsevier, v. 168, p. 191–200, 2018. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877881732563X>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

WANG, J. *et al.* Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 80, p. 1162-1174, 2017. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032117308791>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.

ZEITZ, A.; GRIFFIN, C. T.; DUSICKA, P. Comparing the embodied carbon and energy of a mass timber structure system to typical steel and concrete alternatives for parking garages. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 126-133, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778819305134>> Acesso em: 29 de agosto de 2022.